

**DISEÑO DE UN MODELO ESTADÍSTICO DE ESTIMACIÓN DE LA
RADIACIÓN SOLAR CON PARÁMETROS METEOROLÓGICOS
ALTERNATIVOS PARA EL DISTRITO DE BARRANQUILLA.**

**AGUDELO YEPES DIANA CAROLINA
BARRAZA CORONELL WILLIAM DAVID**

**UNIVERSIDAD DE LA COSTA, CUC
FACULTAD DE CIENCIAS AMBIENTALES
PROGRAMA DE INGENIERÍA AMBIENTAL
BARRANQUILLA
2014**

**DISEÑO DE UN MODELO ESTADÍSTICO DE ESTIMACIÓN DE LA
RADIACIÓN SOLAR CON PARÁMETROS METEOROLÓGICOS
ALTERNATIVOS PARA EL DISTRITO DE BARRANQUILLA.**

**AGUDELO YEPES DIANA CAROLINA.
BARRAZA CORONELL WILLIAM DAVID.**

Tesis

Director: MSc. Andrés Mauricio Vélez Pereira

**UNIVERSIDAD DE LA COSTA, CUC
FACULTAD DE CIENCIAS AMBIENTALES
PROGRAMA DE INGENIERÍA AMBIENTAL
BARRANQUILLA
2014**

Nota de Aceptación

Presidente del Jurado

Jurado

Jurado

Barranquilla, Octubre de 2014.

A Carolina Yepes Zapata mi Madre, por todos sus sacrificios, consejos y apoyo.

A Otoniel Agudelo Agudelo Mi Padre (Q.E.P.D), quien desde el cielo es mi ángel protector, siempre estarás en mi corazón Pá.

A Matilde y William Agudelo, Mis Tíos porque sin su apoyo constante durante todos mis años de estudio hoy no sería quien soy.

A Diego e Ilde Agudelo, mis hermanos y compañeros de batalla, gracias por aguantar a la hermana más intensa y fastidiosa que cualquiera pueda tener.

A Maria Bernarda, Mariett y Elizabeth, más que amigas hermanas, soportaron cada crisis y cada queja; gracias por darme aliento y recordarme porque fue que empecé este viaje, Las Amo!

Diana Carolina Agudelo Yepes

Agradezco primeramente a Dios por ser el guía de mi vida y porque sin el hoy no sería la persona que soy.

A mi madre Magaly Coronell Aicardy por toda su dedicación, sacrificio y amor que me ayudaron a mantenerme en este camino.

A mi hermana Karen Suarez Coronell por sus consejos, gracias a su apoyo en cada etapa de mi carrera pude cumplir mis sueños.

A mis tíos y familiares que me brindaron apoyo cuando lo necesité.

William David Barraza Coronell

AGRADECIMIENTOS

A Andrés Vélez Pereira, por el apoyo, confianza, paciencia, asesoría y comprensión durante el desarrollo de este proyecto; en ocasiones pudiste tirar la toalla y simplemente dejarnos tirados en esto. Pero no lo hiciste, dando muestra del gran ser humano y excelente tutor que eres, nos apoyaste y motivaste hasta el final. Gracias por brindarnos tu tiempo y tus conocimientos, nos sentimos muy orgullosos por haber tenido la oportunidad de tenerte como tutor en este proyecto.

A la Universidad de la Costa y el grupo de investigación Biotecnológico Ambiental por facilitarnos los recursos del presente proyecto mediante la convocatoria de investigación 5.

A nuestros familiares y amigos por el tiempo y el apoyo brindado para el desarrollo de esta tesis, sin su apoyo y motivación nada de esto se habría podido realizar.

A Harold Sukier y el departamento de mantenimiento de la Universidad de la Costa por facilitarnos las obras necesarias para el desarrollo de este proyecto.

A Erika Arbeláez por su apoyo desde la enorme gestión que realiza en el laboratorio del CITA

TABLA DE CONTENIDO

<i>LISTA DE TABLAS</i>	<i>VII</i>
<i>LISTA DE FIGURAS</i>	<i>VIII</i>
1 RESUMEN	10
2 INTRODUCCIÓN	12
2.1 Identificación del Problema	12
2.2 Justificación	15
3 MARCO TEÓRICO	18
3.1 Espectro Electromagnético	18
3.1.1 Leyes de radiación	19
3.2 Magnitudes Radiactivas	20
3.3 Unidades de Medida de la Radiación Solar.	22
3.4 Constante solar (I_{sc}) y el Espectro Solar	22
3.5 Tipos de Radiación	24
3.5.1 Radiación solar global	24
3.5.2 Radiación directa	28
3.5.3 Radiación difusa	28
3.5.4 Balance radiativo.	29
3.6 Medición y Estimación de la Radiación Solar	30
3.6.1 Modelos físicos detallados (espectrales)	31
3.6.2 Modelos paramétricos	32
3.6.3 Modelos estadísticos	32
3.6.4 Modelos estadísticos de regresión	35
4 OBJETIVOS	36
4.1 Objetivo General	36
4.2 Objetivos Específicos	36
5 METODOLOGÍA	37
5.1 Área de Estudio	37
5.1.1 Localización general	37
5.1.2 Climatología	38

5.2	Recuperación de la Información Meteorológica_____	38
5.3	Análisis Estadístico _____	40
5.3.1	Análisis de las series de tiempo_____	40
5.3.2	Estimación del modelo estadístico_____	40
6	<i>RESULTADOS</i> _____	42
6.1	Serie de Tiempo para las Condiciones Meteorológicas_____	42
6.2	Modelos de Estimación (Grupo 1 regresiones no linealizadas) _____	45
6.2.1	Regresiones simples _____	45
6.2.2	Regresiones múltiples _____	47
6.3	Modelos Estadísticos (Grupo 2 regresiones linealizadas) _____	50
7	<i>DISCUSIONES</i> _____	54
8	<i>CONCLUSIONES</i> _____	60
9	<i>REFERENCIAS BIBLIOGRAFÍA</i> _____	61

ANEXO 1

CARTA DE ENTREGA Y AUTORIZACION DE LOS AUTORES PARA LA CONSULTA LA REPRODUCCION PARCIAL O TOTAL, Y PUBLICACION ELECTRONICA DEL TEXTO COMPLETO DE TESIS Y TRABAJOS DE GRADO.

ANEXO 2

FORMULARIO DE LA DESCRIPCION DE LA TESIS O DEL TRABAJO DE GRADO.

LISTA DE TABLAS

Tabla 1 Albedo de algunas superficies. _____	26
Tabla 2 Balance de radiación en W/m^2 . _____	30
Tabla 3 Instrumentos meteorológicos para la medida de la radiación. _____	31
Tabla 4 Factores climatológicos de interés. _____	38
Tabla 5 Regresiones lineales simples y multivariantes. _____	41
Tabla 6 Resumen de los análisis de tiempo de las variables meteorológicas. _____	44
Tabla 7 Resumen de las regresiones simple. _____	47
Tabla 8 Resumen de las regresiones compuestas. _____	50
Tabla 9 Resumen de los regresiones estadísticas. _____	53
Tabla 10 Comparación de las medias mensuales de temperatura durante los meses de monitoreo. _____	54
Tabla 11 Comparación de las medias mensuales de humedad relativa durante los meses de monitoreo. _____	54
Tabla 12 Comparación de los datos promedios mensuales de radiación solar para el Distrito de Barranquilla. _____	55
Tabla 13 Comparación de los datos promedios mensuales de horas de sol para el Distrito de Barranquilla. _____	55

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 Espectro electromagnético. _____	18
Figura 2 Distribución espectral de la energía radiada a partir de cuerpos negros a diferentes alturas. _____	20
Figura 3 Mediciones de la misión SORCE. _____	23
Figura 4 Variación de la radiación solar fuera de la atmósfera terrestre. _____	24
Figura 5 Distribución espectral de la radiación solar. _____	26
Figura 6 Distribución espacial de la radiación global en Colombia, promedio multianual. _____	27
Figura 7 Componente directa de la radiación solar. _____	28
Figura 8 Localización del proyecto. _____	37
Figura 9 Estación meteorológica. _____	38
Figura 10 Accesorios y componentes de la estación meteorológica. _____	39
Figura 11 Medias de horarias para la Radiación Solar. _____	42
Figura 12 Medias horarias de humedad relativa. _____	43
Figura 13 Medias horarias de temperatura. _____	43
Figura 14 Medias de la radiación solar por horas de Sol. _____	44
Figura 15 Comparación de la radiación solar medida y modelada en la regresión simple - tiempo y la radiación solar. _____	45
Figura 16 Comparación de la radiación solar medida y modelada en la regresión simple - humedad relativa y radiación solar. _____	46
Figura 17 Comparación de la radiación solar medida y modelada en la regresión simple - temperatura y radiación solar. _____	46
Figura 18 Comparación de la radiación solar medida y modelada en la regresión simple - horas de sol y radiación solar. _____	47
Figura 19 Comparación de la radiación solar medida y modelada en la regresión múltiple - Tiempo, humedad relativa y radiación solar. _____	48
Figura 20 Comparación de la radiación solar medida y modelada en la regresión múltiple - temperatura, humedad relativa y radiación solar. _____	49
Figura 21 Comparación de la radiación solar medida y modelada en la regresión múltiple - temperatura, tiempo y radiación solar. _____	49

Figura 22 Comparación de la radiación solar medida y modelada en la regresión múltiple - temperatura, humedad relativa, tiempo y radiación solar. _____	50
Figura 23 Comparación de la radiación solar medida y modelada por la ecuación de Angström-Prescott. _____	51
Figura 24 Comparación de la radiación solar medida y modelada por la ecuación de Ögeman et al. (1984). _____	51
Figura 25 Comparación de la radiación solar medida y modelada por la ecuación de Samuel (1991). _____	52
Figura 26 Comparación de la radiación solar medida y modelada por la ecuación de temperatura por Benghamen et al. (2009). _____	52
Figura 27 Comparación de la radiación solar medida y modelada por la ecuación de humedad relativa por Benghamen et al. (2009). _____	53

RESUMEN

La radiación solar global se establece como una variable compleja de monitorear, y su cuantificación es necesaria para el entendimiento de los procesos biológicos y químicos del ambiente. No obstante, la radiación solar puede ser estimada mediante procesos de posicionamiento, formulas empíricas o modelos, donde cada uno de estos procesos es más confiable que la anterior, pero a su vez requieren mayor cantidad de información y procesos más complejos de estimación. El objeto del presente trabajo fue establecer un modelo para la estimación de la radiación solar en el Distrito de Barranquilla a partir de los datos meteorológicos alternos. Los datos se corresponden a cuatro meses de monitoreo, realizados con una estación hidrometeorológica Davis modelo Vantage Pro 2 ubicada en la Universidad de la Costa, y registrando datos de radiación solar, temperatura, humedad relativa de manera simultánea cada 5 minutos. Los datos se analizaron mediante análisis ANOVA, y se trataron mediante regresiones simples y multivariantes; y por ecuaciones paramétricas preestablecidas por otros autores. El análisis ANOVA demostró que la radiación solar presenta la menor variación intrahoraria, mientras que temperatura presenta la mayor variación. Los modelos regresión presentaron mejor ajuste (mayor en las regresiones multivariantes) que los modelos estadísticos. El modelo que presenta el mejor resultado para estimar la radiación solar lo establece la regresión multivariable que incluye todas las variables, que si bien no es el modelo más simple de implementar, permitiría estimar la radiación solar con un buen nivel de confiabilidad.

Palabras claves

Radiación solar, estimación de la radiación solar, modelos estadísticos.

ABSTRACT

The global solar radiation is complex variable of monitoring, and its quantification is necessary for the understanding of biological and chemical processes in the atmosphere. However, the solar radiation can be estimated by positioning processes, empirical formulas or models, where each of these more reliable than previous processes, but in turn require more information and complex processes to the estimation. The purpose of this work is to establish a model for estimating solar radiation in the District of Barranquilla from alternate meteorological data. The data correspond to four months of monitoring, performed with a hydrometeorological station Davis Vantage Pro 2, located at the University of Costa, and recording data of solar radiation, temperature, relative humidity has been simultaneously every 5 minutes. Data were analyzed by ANOVA, and treated by simple and multivariate regression; and parametric equations preset by other authors. ANOVA shows that solar radiation has the smallest variation intrahoraria while presents the highest temperature variation throughout a day. The regression models showed better fit (more in the multivariate regressions) that statistical model. The model that shows the best result is the multivariate regression with all variables, which although not the simplest to implement model would estimate solar radiation with a good level of reliability.

Keywords

Solar radiation, solar radiation estimation, statistical model.

1 INTRODUCCIÓN

1.1 Identificación del Problema

En muchos países del mundo los datos sobre la radiación solar son de fácil acceso, pues se cuenta con los equipos necesarios para realizar la medición directa de la radiación, así como otras variables meteorológicas de interés. No obstante, en nuestro país la información es insuficiente¹, lo cual provoca desconocimiento sobre procesos biogeoquímicos y las áreas afectadas, esto si se tiene en cuenta que la radiación solar constituye como fuente principal en la dinámica atmosférica.

La radiación de onda corta emitida por el sol sufre un proceso de difusión, reflexión en las nubes y de absorción por los gases y moléculas suspendidas en el aire; al entrar en contacto con los océanos y los continentes la energía se absorbe o se refleja en forma de onda larga proporcionando calor a la atmosfera (Flores, 2006); Por otro lado, la radiación UV que acompaña a esta radiación interacciona con los constituyentes atmosféricos de la estratosfera condicionando la variabilidad del ozono. Finalmente, parte de esta radiación alcanza la superficie terrestre participando en el balance energético terrestre, los procesos biológicos (fotosíntesis), ecológicos (modificaciones del ecosistema) y fotoquímicos (formación y descomposición de contaminantes) dentro de esta dinámica la radiación solar contribuye con la formación del ozono creando los contaminantes secundarios del aire (O_3 , NO_2 , H_2SO_4) (Martínez, 2010; Antón, 2008).

La absorción de la radiación por gases como el ozono y vapor de agua calienta la atmósfera, estimulando la emisión de la radiación de onda más larga; parte de esta radiación es liberada al espacio, en niveles muy altos y otra parte es irradiada nuevamente a la Tierra (Sánchez, 1990); Este fenómeno permite que la Tierra almacene más energía cerca de su superficie que la cantidad que podría almacenar, si la Tierra no tuviera atmósfera. La radiación solar no solo calienta la atmosfera, puesto que es la causante de los desequilibrios en la química atmosférica, por su activación en las reacciones fotoquímicas que posteriormente serán dispersadas y transportadas en la dirección del viento predominante, aumentando la circulación de contaminantes producto del desequilibrio (Rojas et al., 2002).

Así mismo, los datos de radiación solar tienen gran importancia en la aplicación de diversos campos. Uno de los principales usos de la información se corresponde con el análisis de carga térmica en edificios ubicados,

¹ IDEAM (sf), Respuesta recibida por el IDEAM al momento de realizar la solicitud de la información.

frecuentemente en zonas donde se presentan estaciones climáticas; otro aspecto relevante lo establece el potencial eléctrico producto de la radiación en la planificación de las plantas de energía renovables; finalmente los datos de radiación solar suelen emplear en la meteorología, las ciencias agrícolas, la salud, implementación de nuevas tecnologías y también para algunos análisis de impacto ambiental (Mellit y Pavan, 2010).

Por otro lado y aunque parece un aspecto secundario, la radiación solar, la posición del sol, el trazo de los surcos y la distancia entre plantaciones resulta una variable de interés, puesto que determinan el desarrollo de los cultivos. Para establecer una plantación hay que tener en cuenta el movimiento del sol, el fenómeno de traslación de la tierra y la inclinación de su eje, presentando días más largos y más cortos durante el año. La medición de la radiación solar es tomada en intervalos de horas, días y meses; siendo los horarios más comunes, debido a que el análisis de los datos a corto plazo permite tener valores más precisos sobre el rendimiento estimado de los sistemas de energía solar (Vijayakumar et al., 2005).

Muchas de las actividades humanas que se realizan al aire libre, se asocian a enfermedades por exposición a los rayos UVA y UVB, soportados por el incremento de la radiación desde los años setenta. Según lo señalado por algunas investigaciones médicas la radiación ultravioleta ocasiona el fotoestrés oxidativo de la piel, mediado por mecanismos tales como la absorción, reflexión o dispersión. Sus consecuencias pueden ser varias, como fenómenos inflamatorios, cáncer, tumores malignos, inmunosupresión, arrugas y envejecimiento acelerado, daños celulares y estructurales (Villegas et al., 2005; Downs y Parisi, 2012). Adicionalmente, la exposición permanente a la radiación solar representa un riesgo para los intestinos, produce diarrea, náuseas, vómito, resequedad en los labios, obesidad, fallas en órganos y sistemas vitales, úlceras en la boca, artritis y afecta el crecimiento (Magee, 2010; Stoeber et al., 2006), entre muchos otros efectos nocivos la radiación puede afectar la vista, produciendo enfermedades como la fotoqueratitis, cataratas y degradación en la mácula (Antón, 2008).

La incidencia del cáncer de piel continua en aumento, en el Reino Unido el cáncer de piel es el más común con 67.000 casos de melanoma diagnosticados en 2002 (Haywood et al., 2010). Para el caso de Colombia se presenta gran desinformación en el tema de los efectos nocivos de la radiación solar debido a la inexistencia o deterioro de las estaciones meteorológicas para la medición de la radiación solar ultravioleta. La radiación solar también presenta efectos positivos, como lo plantean Webb y Holick, (1988), la exposición en tiempos moderados a la radiación es imprescindible para que nuestro cuerpo realice la síntesis de la vitamina D, micronutriente fundamental

para la correcta absorción del calcio, permitiendo su depósito en los huesos y la regulación de los niveles de este en la sangre.

El desconocimiento de los valores de radiación solar está relacionado con la poca implementación de nuevas tecnologías de energía solar como la fotovoltaica de módulos solares, sistemas para la regulación de la temperatura en los edificios y aprovechamiento de las horas de sol en los cultivos (Bergozini et al., 2010). La información no está siempre disponible en muchos lugares, puesto que los costos de mantenimiento y calibración que requieren los equipos de medición son muy altos. No obstante, las limitaciones de la cobertura de medición pueden ser solventados por modelos de estimación de la radiación solar a partir de otros datos meteorológicos presentes en la zona de estudio (Wong y Chow, 2001). Adicionalmente a los costos, posicionar una estación meteorológica de forma adecuada para arrojar datos válidos y representativos resulta ser en algunas ocasiones complejo, pues se necesita considerar ciertas variables como la latitud, altitud, topografía del lugar, contar con un lugar despejado, de fácil acceso, libre de objetos que puedan dar sombra a los sensores en cualquier época del año, entre otros (Lozano et al., 2013).

En la actualidad se han desarrollado modelos para la estimación de la radiación solar a partir de datos meteorológicos disponibles; estos modelos pueden ser físicos basados en la solución de la ecuación de transferencia radiativa, pero necesitan datos muy complejos y de difícil obtención. Por otro lado los están modelos paramétricos, basados en el conocimiento de variables atmosféricas disponibles o derivadas de datos conocidos, y finalmente se encuentran los modelos estadísticos, que permiten determinar la radiación solar directa a partir de variables como velocidad y dirección del viento, radiación solar, temperatura, horas de sol, entre otras, sin un algoritmo para el cálculo de la transmitancia (Escamilla, 2011).

En el Distrito de Barranquilla la radiación solar es uno de los parámetros meteorológicos menos medidos, a pesar de contar con dos estaciones meteorológicas convencionales y dos estaciones automáticas satelitales con radiación global horaria (difusa + directa), La información reportada para el caso de radiación solar carece de confiabilidad¹. Teniendo en cuenta lo anterior la presente investigación está enfocada a resolver la siguiente pregunta problema ¿Cuál es el modelo que mejor estima relación existente entre las condiciones meteorológicas y los valores de radiación solar establecidos en la ciudad de Barranquilla?, para ellos se resolverán las siguientes preguntas derivadas de la metodología: ¿Cuál es la variación de las condiciones meteorológicas de la Ciudad de Barranquilla?, ¿Cuál es la relación de cada una

de estas variables con los valores de radiación solar?, ¿Cuál es el modelo estadístico que presenta un mejor ajuste para estimar la radiación solar?.

1.2 Justificación

La exposición exagerada a la radiación solar resulta perjudicial para la salud y el aumento de la expectativa de vida humana, llevando a la población mundial a permanecer más tiempo expuesto a las radiaciones solares con el riesgo de contraer cáncer de piel (Flores, 2006). El desconocimiento de la afección a la salud y el potencial que representa la utilización de la radiación solar como un tipo de energía renovable y de uso en construcciones es un problema de fondo.

Las fuentes de energía son vitales para todas las actividades humanas por ello el incremento de la población mundial genera una gran demanda de energía; teniendo en cuenta que la energía solar es casi inagotables representa para los investigadores una alternativa viable para satisfacer la creciente demanda de una energía limpia y renovable (Wang y Dickinson, 2014). Sumado a esto, la incertidumbre de contar o no con la energía fósil a futuro, la contaminación al medio ambiente y al aire por la producción de este tipo energía, reflejan una crisis energética por el alto costo de producción, y la demanda que aumenta de manera exponencial; por tal motivo crece la necesidad de utilizar o producir una nueva energía que sea renovable, limpia y de bajo costo; es por esta razón, muchos científicos e investigadores trabajan en encontrar una fuente de energía renovable que puedan contribuir con las necesidades futuras de energía, existen muchas fuentes de esas energías renovables, pero el sol puede ser considerada como la principal fuente de este tipo y su desconocimiento en cuanto a la cantidad de energía insolada se establece como una limitante a los procesos (Ali, 2013).

La energía eólica y solar, son de los tipos de energía renovables más usados debido al comportamiento de los vientos y a la disponibilidad de horas de sol diaria (Kaplanis y Kaplani, 2010). Si bien los precios de los sistemas de energías renovables representan un alto costo en la inversión inicial, se ve reflejado en las ganancias y ahorro de energía. En las construcciones, desde hace algún tiempo se han implementado sistemas que aprovechan la radiación para regular la temperatura en los edificios diseñando estructuras en las que se aprovechen las horas de sol y la intensidad de la radiación (Hematian et al., 2012; Fayadh, 2011), esto se evidencia en países como España donde existe un reglamento para las instalaciones térmicas en los edificios (RITE), expedido en el año 2007 por el ministerio de la presidencia de España, obligando a instalar calentadores solares en todas la viviendas privadas, nuevas o reformadas y placas fotovoltaicas en todas las grandes superficies comerciales y de oficinas para reducir los consumos energéticos de las mismas.

Debido a las demandas energéticas cada vez mayores, el peligro del agotamiento de los suministros de energía fósiles y el hecho de que los componentes del sistemas de energías renovables y sus instalación son considerablemente caros, hace que se piense en la radiación solar como una energía alternativa que genera mayor densidad de potencia usada para el funcionamiento de módulos fotovoltaicos (Bergozini et al., 2010; Hocaoglu, 2010). En países como Estados Unidos y Alemania la cantidad de radiación promedio anual es de 4,6579 KWh/m²/día y 2,9108 KWh/m²/día respectivamente, la cual se asocia con una capacidad fotovoltaica instalada de 12,9084 MWp y una generación anual de 22,4402 GWh. Para el caso de Estados Unidos, mientras que para Alemania se reporta una capacidad fotovoltaica instalada de 18,0058 MWp y 17,664 GWh generación anual (Sueyoshi, 2014).

Además de las ventajas que representa la radiación solar en las construcciones y su uso como energía renovable, también presenta relevancia en los estudios realizados a los ecosistemas (Almorox et al., 2008). La interacción entre la radiación solar y los diferentes factores ambientales, forma parte los procesos biológicos como la fotosíntesis, la absorción de nutrientes y la humedad del suelo, estableciéndose como un factor vital para mantener el equilibrio y la productividad de los ecosistemas (Cavatte et al., 2009; Liu et al., 2009).

En la agricultura es una de los sectores económicos que depende directamente de la radiación solar, pues la productividad y el crecimiento de los cultivos están estrechamente relacionados con este factor ambiental (Forsythe, 2010; Bindi y Miglietta, 1991). Recientemente se han desarrollado estudios en los que se analizaba la exposición directa de los cultivos de papa, tomate y café a los rayos del sol, de un 100% de exposición a un 50%, los resultados mostraron que para los cultivos con una exposición de 70% a 100% se obtuvo mayor numero y cantidad de biomasa (frutos, tubérculos). Por tal motivo se puede afirmar que a menor radiación disminuye la eficiencia fotosintética de la planta y por consiguiente la biomasa, el tubérculo y tasa de crecimiento de los cultivos (Jarma, 2012; Flores et al., 2009).

Es claro que la exposición a la radiación solar produce efectos nocivos en los seres humanos y que actualmente en el país, no existen políticas específicas para el aprovechamiento de la radiación solar como una energía renovable, en este sentido según lo expuesto por Antón (2008), los modelos de estimación son necesarios para obtener valores de la radiación solar en zonas donde no existen instrumentos para la medición de este parámetro. Pues como se ha mencionado anteriormente las estaciones dedicadas a el registro continuo de la radiación son escasas. Por lo tanto, estos modelos se convierten en herramientas fundamentales para la evaluación de los efectos de la radiación

solar e identificar posibilidades de aprovechamiento como una energía renovable.

Es por esto que para el caso de Barranquilla este proyecto se presenta como un primer acercamiento y alternativa para establecer el conocimiento científico sobre la radiación solar, esto resulta imperante teniendo en cuenta que es un Distrito densamente poblado, con un nivel de industrialización importante y una alta demanda de energía, lo que ocasiona una creciente necesidad de implementar nuevas tecnologías para lograr un desarrollo urbanístico e industrial eficiente y sostenible.

2 MARCO TEÓRICO

El Sol se constituye como la principal fuente de luz y calor para la Tierra; posee una masa de $1,99 \times 10^{30}$ kg y un radio de aproximadamente 695.000 km. (IDEAM, 2005. Tola, 2003; Rius y Castro-Acuña, 2002; Bakirci, 2009), proporcionando a la Tierra toda la energía necesaria para alimentar los procesos físicos y biológicos que tienen lugar en el planeta (Consejería de Medio Ambiente e Infraestructura de Galicia CMATI, 2011; Sancho et al, 2012; Chen et al, 2011). En este sentido La radiación solar se define como energía emitida por el sol que se propaga en todas las direcciones a través del espacio mediante ondas electromagnéticas y partículas que varían en longitud desde nanómetros (nm) de 0.001 a más de 100.000.000 nm (IDEAM, 2005; CMATI, 2011; Iqbal, 1983). Estas ondas no necesitan un medio material para propagarse, pueden atravesar el espacio interplanetario y llegar a la Tierra desde el Sol (Sancho et al, 2012). La intensidad de las ondas que llegan a la tierra proveniente del sol está asociada a las características descritas a continuación.

2.1 Espectro Electromagnético

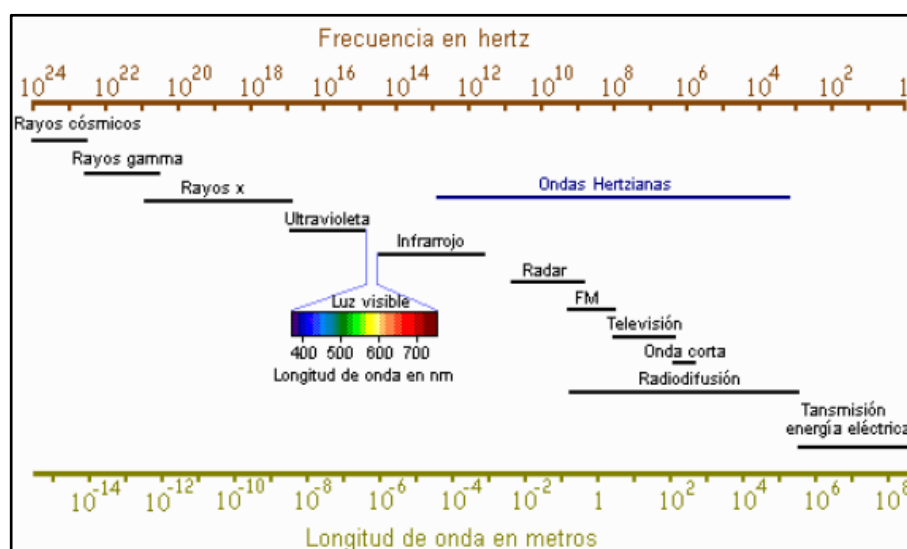


Figura 1 Espectro electromagnético.

(Fuente: IDEAM, 2005).

La energía solar se puede establecer o medir en función del espectro electromagnético (ver Figura 1). La parte del espectro entre 1nm y 1000000 nm es considerada como luz, sin embargo no toda luz es visible (IDEAM, 2005). La luz con longitud de onda de entre 1nm a 390 nm es conocida como luz ultravioleta (Gándara, 2011), mientras que la luz visible se establece entre las longitudes de 400 y 760 nm; finalmente la luz con longitud de onda mayor a 760 nm y menor a 1000 nm, es conocida como infrarroja y tal como la luz

ultravioleta, es visible al ojo humano. Cuando la longitud de onda de la luz infrarroja es mayor a 3000 nm se percibe como calor (Gliessman, 2002).

En ausencia de atmósfera, esta radiación alcanzaría en su totalidad la superficie terrestre. Sin embargo, la presencia de dicha atmósfera atenúa y modifica la radiación que la atraviesa mediante procesos combinados de dispersión y absorción (González et al., 2006). Para diversos propósitos (fotosíntesis, celdas solares, conservación de la salud o de materiales, etc.) es necesario conocer cómo está distribuida la energía de acuerdo con la longitud de onda o la frecuencia de acuerdo con su distribución espectral (Sarmiento, 2007).

2.1.1 Leyes de radiación

El IDEAM, (2005) sustenta que para entender mejor cómo la energía radiante del Sol interactúa con la atmósfera de la tierra y su superficie, se deben conocer las leyes básicas de radiación.

Según Castillo et al. (1999) las leyes de la radiación son las siguientes:

- Todos los objetos con temperatura mayor a 0 °K emiten energía radiante, por ejemplo: el Sol, la Tierra, la atmósfera, las personas, etc.
- Los objetos con mayor temperatura irradian más energía total por unidad de área que los objetos más fríos (ver Figura 2). Por ejemplo, el Sol con una temperatura media de 5.800 °K en su superficie emite aproximadamente 64 millones W/m², 165.000 veces más energía que la Tierra (la cual emite cerca de 390 W/m²).
- Los cuerpos con mayor temperatura emiten un máximo de radiación en longitudes de ondas cortas. Por ejemplo, el máximo de energía radiante del Sol se produce en $\lambda \sim 0,5 \mu\text{m}$, mientras que para la Tierra en $\lambda \sim 10 \mu\text{m}$.
- Los objetos que son buenos absorbedores de radiación son también buenos emisores, este es un principio importante para comprender el calentamiento en la atmósfera, porque sus gases son absorbedores y emisores selectivos en longitud de onda. Así, la atmósfera es aproximadamente transparente (no absorbe) a ciertas longitudes de onda de radiación y aproximadamente opaca (buen absorbedor) en otras longitudes de onda.

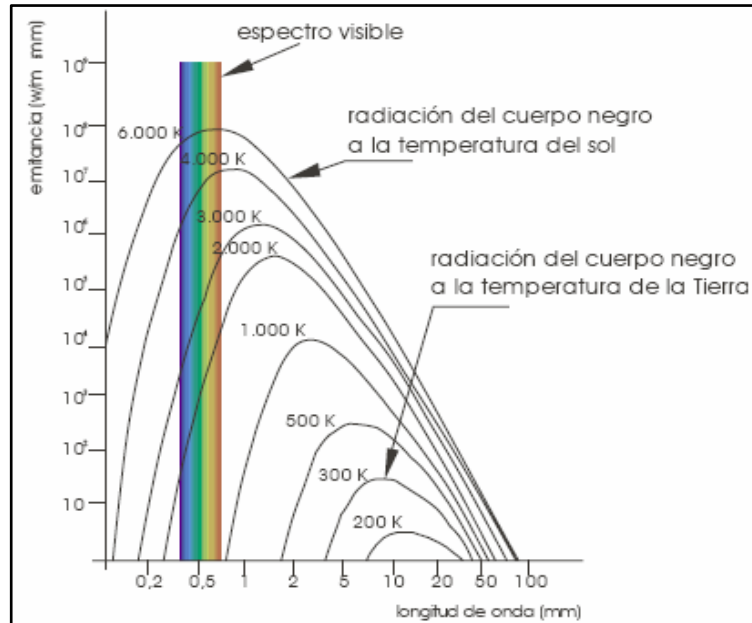


Figura 2 Distribución espectral de la energía radiada a partir de cuerpos negros a diferentes alturas.
(Fuente: IDEAM, 2005).

Un absorbedor perfecto se llama “cuerpo negro”, que se define como un objeto ideal que absorbe toda la radiación que llega a su superficie, actualmente no se conoce ningún objeto así, aunque una superficie de negro de carbono puede llegar a absorber aproximadamente un 97% de la radiación incidente (Zúñiga y del Arco. 2010). El Sol, la Tierra, la nieve, etc., bajo ciertas condiciones se comportan como un cuerpo negro; sin embargo, en teoría un cuerpo negro sería también un emisor perfecto de radiación y emitiría a cualquier temperatura la máxima cantidad de energía disponible (IDEAM, 2005).

2.2 Magnitudes Radiactivas

Las magnitudes radiactivas se clasifican en dos grupos según su origen, la radiación solar y la radiación terrestre. La radiación terrestre se contempla como la energía electromagnética de onda larga emitida por la superficie terrestre y por los gases, los aerosoles y las nubes de la atmósfera, y es también parcialmente absorbida en la atmósfera (IDEAM, 2005). De acuerdo con Sánchez (1990), cada gas atmosférico es un absorbente selectivo de la radiación terrestre, absorben algunos a ciertas longitudes de onda y dejan pasar otros componentes. Por ejemplo, el ozono no absorbe moderadamente el infrarrojo más que en la banda de 9600 nm a 15000 nm; mientras el vapor de agua y el anhídrido carbónico son absorbentes importantes de la radiación terrestre; entre los dos absorben la mayoría de las longitudes de onda de esta radiación. Aunque parte de la radiación solar es absorbida por los gases atmosféricos, es la radiación terrestre de onda larga calentando la atmósfera;

donde el vapor de agua y el CO₂ se establecen como los principales componentes atmosféricos que la absorben, llamados por esto gases de efecto invernadero (Sediña y Pérez, 2006).

Entre los rango de absorción existe una región comprendida entre 8000 y 12000 nm de longitud de onda en la que al atmósfera es prácticamente transparente a la radiación terrestre, esta región se denomina “ventana atmosférica” permitiendo el paso de la radiación al exterior (Sediña y Pérez, 2006). Por lo tanto, la superficie terrestre recibe y emite radiación de onda larga, siendo la diferencia entre la radiación de onda Larga entrante y la saliente lo que se conoce como la radiación neta de onda larga. Como la radiación saliente es siempre mayor que la radiación entrante, representa una pérdida de energía (Allen. 2006).

El índice de claridad o transparencia atmosférico es un valor obtenido a partir del cociente entre la radiación solar que llega a la parte exterior de la atmósfera y la radiación solar que llega a la superficie (Martínez et al., 2008). Fundamentalmente, nos da información de cuánta radiación alcanza la superficie de la tierra en función de la radiación extraterrestre (o radiación que hay antes de iniciar su paso a través de la atmósfera); en días claros, los valores de este índice serán elevados (por encima de 0.8) y en días nublados pueden llegar a ser muy bajos (incluso por debajo de 0.1). Un valor alto, por ejemplo 0.8, nos indica que el 80% de la radiación que había en el exterior de la atmósfera ha alcanzado la superficie de la tierra. (Castillo-Alvarez et al., 2007).

La radiación solar extraterrestre es la energía que incide en el límite de la atmósfera terrestre, siendo una densidad de flujo de radiación solar, con unidades, en el sistema internacional de J/s-m² o W/m² (Llorca, 2006). La irradiancia extraterrestre en una superficie horizontal se describe mediante la ecuación 1.

$$I_0 = I_{sc} E_0 \cos \theta_z = I_{sc} E_0 (\sin \delta \sin \varphi + \cos \delta \cos \varphi \cos \omega) (Wm^{-2}) \quad \text{Ecuación 1}$$

Durante un periodo de tiempo dt:

$$dI_0 = I_{sc} E_0 \cos \omega_z dt \quad \text{Ecuación 2}$$

El tiempo en horas se puede convertir en ángulo horario, según la expresión:

$$\frac{2\pi rad}{24 h} = \frac{d\omega}{dt}; dt = \frac{12}{\omega} d\omega \quad \text{Ecuación 3}$$

La ecuación anterior quedara:

$$dI_0 = \frac{12}{\pi} I_{sc} E_0 (\sin \delta \sin \varphi + \cos \delta \cos \varphi \cos \omega) d\omega$$

Ecuación 4

Dónde:

E_0 : Es la corrección por la variación de la distancia entre la tierra y el sol

I_{sc} : es la constante solar.

δ : declinación solar en grados

φ : latitud en grados del lugar

ω : ángulo horario en grados

Las radiaciones caloríficas y otras formas de radiaciones provenientes del sol, influyen en el estado de la atmósfera (Poggy- Varaldo et al., 2009). La emisión de calor del sol hacia la atmósfera exterior tiene lugar como consecuencia de las continuas reacciones térmicas en su interior, esta emisión de calor se efectúa a través del proceso de transmisión de calor por radiación (de Felipe y Martínez, 1999).

2.3 Unidades de Medida de la Radiación Solar.

Las cantidades de radiación son expresadas generalmente en términos de exposición radiante o irradiancia, siendo esta última una medida del flujo de energía recibida por unidad de área en forma instantánea y cuya unidad es el vatio por metro cuadrado (W/m^2) (Vallina, 2010).

El IDEAM (2005), estipula que para algunas bandas espectrales, como la visible y la ultravioleta se utilizan las siguientes unidades, en particular:

- ✓ Radiación visible o radiación activa en fotosíntesis (PAR, por sus siglas en inglés): Instantánea ($E/cm^2 \cdot s$: donde E = Einsten) y la integrada (Eh/cm^2).
- ✓ Radiación ultravioleta: instantánea ($W/cm^2 \cdot nm$) y la integrada ($Wh/cm^2 \cdot nm$), en cada longitud de onda medida.

2.4 Constante solar (I_{sc}) y el Espectro Solar

El flujo de energía radiante que el sol emite en todas las direcciones llega al límite superior de la atmósfera terrestre con un valor prácticamente constante. (Barros, 2006). De esta forma se define la constante solar (I_{sc}) como la cantidad de energía proveniente del sol que por unidad de tiempo incide perpendicularmente sobre una superficie de área unitaria colocada fuera de la atmósfera terrestre (IDEAM, 2005). La determinación experimental de la constante solar se estima, midiendo la radiación que llega a la superficie

terrestre después de atravesar la atmósfera, tras ser parcialmente absorbida y dispersada por los constituyentes atmosféricos (Barros, 2006). El valor que actualmente se utiliza es 1.370 W/m^2 y oscila aproximadamente en 1.2 W/m^2 entre el máximo y el mínimo del ciclo (World Radiation Center WRC, 2014).

El error estimado en este valor es de 1.6 W/m^2 , y es el adoptado por el WRC); se obtiene por medio de la potencia irradiada del sol, de acuerdo con la Ecuación.

$$I = \frac{P}{S} = \frac{4 \times 10^{26}}{4\pi(1.5 \times 10^{11})^2} = 1.4 \text{ KWm}^{-2} \quad \text{Ecuación 5}$$

Para la sorpresa de muchos investigadores, la constante solar ha resultado no ser constante, pues se asevera que la constante solar es un “oxímoron”(NASA, 2010). Los datos proporcionados por satélites muestran que la irradiancia total del Sol crece y disminuye significativamente con el ciclo de manchas solares (Figura 3) (NASA, 2010).

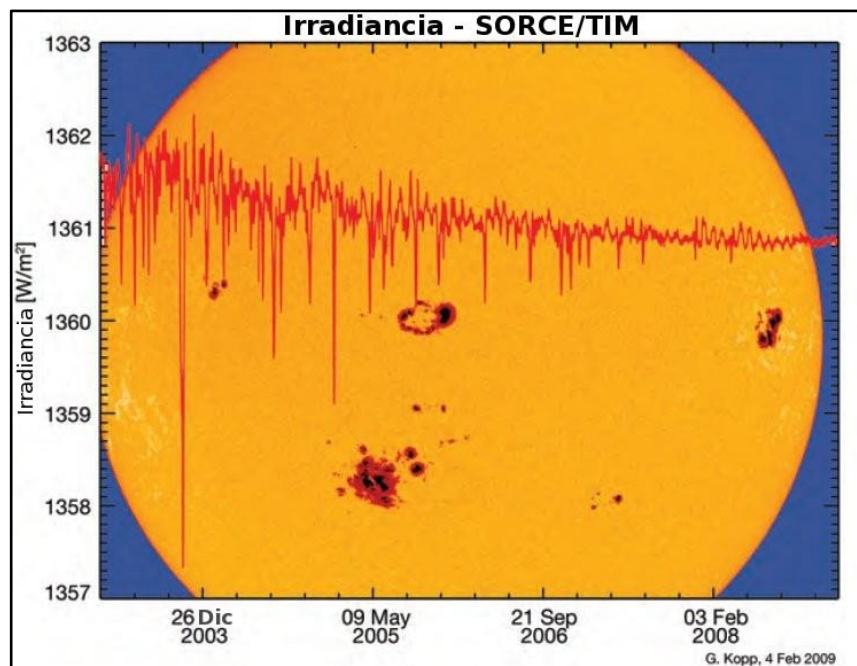


Figura 3 Mediciones de la misión SORCE.
(Fuente: NASA. 2010)

La intensidad de la energía solar varía inversamente proporcional al cuadrado de la distancia al Sol, entonces en el movimiento de translación de la Tierra cambia la distancia Tierra-Sol durante el año origina una variación de la radiación solar extraterrestre incidente sobre una superficie normal al rayo solar como evidencia en la Figura 4.

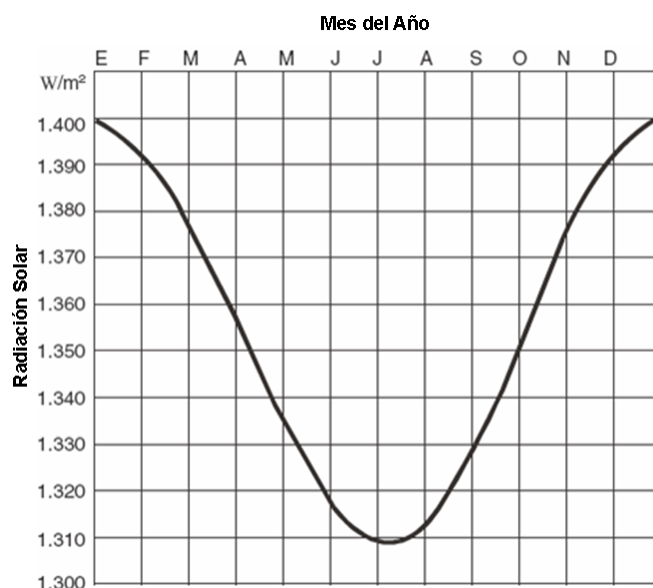


Figura 4 Variación de la radiación solar fuera de la atmósfera terrestre.
(Fuente: IDEAM, 2005).

El atlas de radiación solar de España expone que la radiación solar que llega a la superficie de la Tierra está condicionada por dos factores de distinta naturaleza (CIMAT, 2011):

- Factores astronómicos que dependen de la geometría Tierra-Sol, estando en función de la posición relativa Sol-Tierra y de las coordenadas geográficas de latitud y longitud. Estas características condicionan básicamente el recorrido de la radiación a través de la atmósfera y el ángulo de incidencia de los rayos solares.
- Factores climáticos atenuarán la misma, las nubes, la cantidad de vapor de agua, ozono, aerosoles, entre otros contenidos en la atmósfera son los responsables de esta atenuación, que ocurre fundamentalmente por absorción, reflexión y difusión de la radiación.

2.5 Tipos de Radiación

2.5.1 Radiación solar global

Es el resultado de la componente vertical de la radiación directa más la radiación difusa, El aporte de cada componente a la radiación global, varía con la altura del Sol, la transparencia de la atmósfera y la nubosidad (IDEAM, 2005). Debido a la forma esferoide de la tierra y las características de la atmósfera, se presentan variaciones en la intensidad de la onda electromagnética que produce la radiación solar por el ozono (en la zona del ultravioleta) y por el vapor de agua y CO₂ (en la zona del infrarrojo) (Vallina,

2010). Llorca y Carrascosa (2011), sustenta que serán más importantes en cuanto mayor sea el recorrido de la radiación a través de la atmósfera.

Los procesos de atenuación que sufre la radiación solar en su trayectoria hacia la tierra lo constituyen en primera medida la dispersión, que ocurre cuando un fotón afecta a un obstáculo sin ser absorbido cambiando solamente la dirección del recorrido de ese fotón (IDEAM, 2005). La dispersión depende de la longitud de onda, en cuanto más corta sea ésta, mayor será la dispersión (Vallina, 2010). Los constituyentes atmosféricos responsables de la dispersión son los aerosoles, las gotas de agua, los cristales de hielo y las moléculas gaseosas (Barros, 2006). Seguidamente se encuentra la absorción, que como su nombre lo indica sucede cuando la radiación pasa por un determinado gas, y la frecuencia de la radiación electromagnética es similar a la frecuencia vibracional molecular del gas (IDEAM, 2005). Cuando un gas absorbe energía, esta se transforma en movimiento molecular interno que produce un aumento de temperatura (Villón, 2004). Por otra parte, la absorción de la radiación es selectiva, debido principalmente a los componentes gaseosos atmosféricos como las nubes y los aerosoles, viéndose afectado el potencial de radiación solar por factores como la topografía, altitud del sol, nubes y las condiciones de la superficie (Martínez, 2007).

Ahora si contextualizamos la radiación solar en función de la visibilidad de la atmósfera, definida como la máxima distancia que se puede ver un objeto oscuro en el horizonte de un determinado tamaño. Se puede inferir que la visibilidad depende de la transmisión de la luz en la atmósfera y el contraste del objeto con el fondo. Ambos fenómenos se encuentran afectados por los fenómenos de absorción y dispersión de la radiación solar visible. La presencia de gases o aerosoles puede variar el valor del coeficiente, al participar de los procesos de absorción y dispersión. La dispersión debida a los gases atmosféricos es conocida como la dispersión de Leigh, que contribuye un poco a la reducción de la visibilidad. En este tipo de dispersión no cambia la frecuencia de la luz, ya que se produce con partículas de gases menores a $0.1\mu\text{m}$, menores a la longitud de onda incidente (Seoáñez et al., 2002).

La cantidad de energía en forma de radiación solar que llega a un lugar toma el nombre de insolación, puede ser insolación diurna si se toma en un día o anual si se toma en intervalos de un año (Felicísimo et al, 2001). El Porcentaje reflejado de la insolación se define como Albedo que es la fracción de energía incidente sobre una superficie, y que es reflejada por esta (Martínez et al., 2005). El Albedo de la Tierra varía con la altitud y estacionalmente; su valor promedio es de 30% y el Albedo medio para las nubes oscila entre 50% y 60% dependiendo del tipo y del grosor (Rojas et al., 2013, Palle et al., 2006). El

albedo es un importante factor de equilibrio energético y determina la tasa de calentamiento de la superficie de un planeta ver Tabla 1 (Trigo, 2000).

Tabla 1 Albedo de algunas superficies.

Superficie	Albedo %
Nieve Fresca	80 – 85
Arena	20 – 30
Pasto	20 – 25
Bosque	5 – 10
Suelo seco	15 – 25
Agua (Sol cerca del Horizonte)	50 – 80
Agua (Sol cerca del Cenit)	3 – 5
Nube gruesa	70 – 80
Nube delgada	25 – 30
Tierra y atmósfera global	30

(Fuente: IDEAM, 2005)

La atmósfera en la parte visible del espectro tiene bajo poder de absorción, mientras que en el resto de longitudes de onda posee un significativo poder de absorción de radiación ultravioleta o radiación de onda corta procedente del sol siendo el ozono el principal responsable de este fenómeno, así mismo la atmósfera posee una gran capacidad para absorber la radiación infrarroja o de onda larga procedente de la Tierra y los responsables en este caso son el vapor de agua, el dióxido de carbono y otros gases traza como el metano y el óxido nitroso (Ver Figura 5). (IDEAM, 2005).

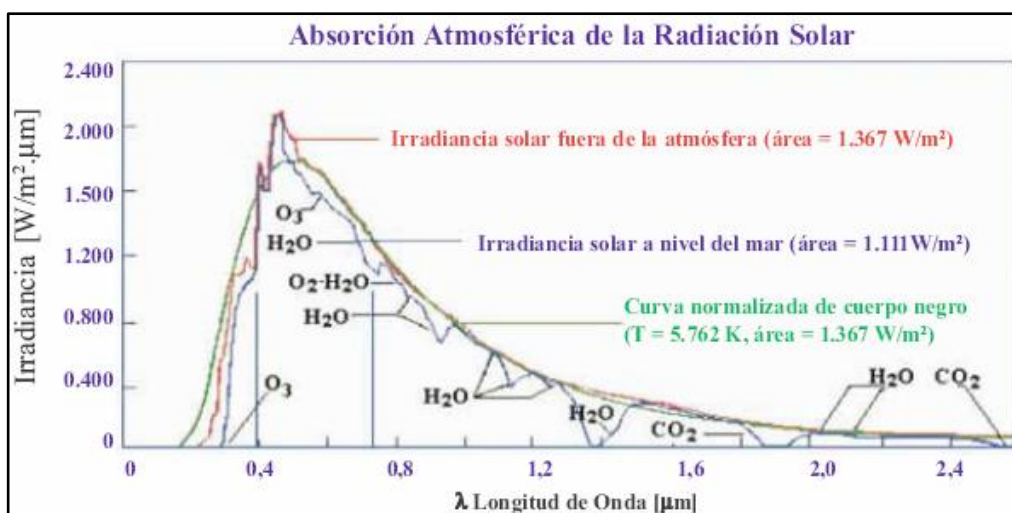


Figura 5 Distribución espectral de la radiación solar.
(Fuente: Atlas de radiación solar de Colombia, 2005).

El IDEAM (2005) estipula que a partir de la energía terrestre emitida por la superficie de 390 W/m^2 solo 40 W/m^2 escapan directamente al espacio por la

ventana atmosférica donde el exceso de energía recibida por la superficie es compensado por procesos no-radiativos tales como la evaporación (flujo de calor latente de 80 W/m^2) y la turbulencia (flujo de calor sensible de 24 W/m^2). La diferencia entre la emisión radiativa de la superficie de la Tierra (390 W/m^2) y el total de emisión infrarroja al espacio ($40 + 200 = 240 \text{ W/m}^2$) representa la energía atrapada en la atmósfera (150 W/m^2) por el efecto invernadero. La parte del efecto invernadero causado por el aumento de CO_2 debido a las emisiones antrópicas supone en la actualidad un incremento radiativo de $1,4 \text{ W/m}^2$.

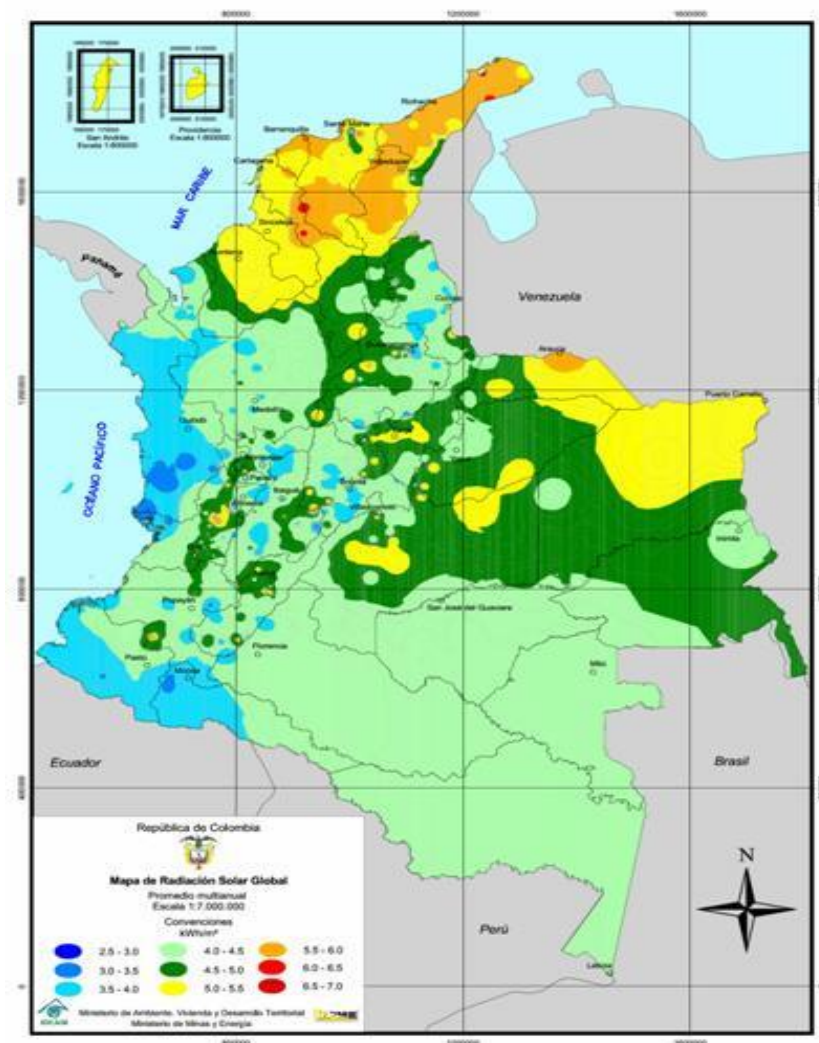


Figura 6 Distribución espacial de la radiación global en Colombia, promedio multianual. (Fuente IDEAM, 2005).

El IDEAM determinó, que sobre la mayor parte del territorio Colombiano la incidencia de la radiación solar global tiene promedios entre 4,0 y 4,5 kW-h/m^2 por día, especialmente sobre gran parte de la Amazonía y la región Andina, así como en sectores de la región Pacífica y la Orinoquía, además que las zonas que reciben mayor intensidad de radiación solar global en Colombia, superiores

a los 5,0 kW-h/m² por día las comprende la región Caribe, nororiente de la Orinoquia, amplios sectores de Meta y Casanare y pequeños sectores de los departamentos de Cauca, Huila, Valle, Tolima, Cundinamarca, Boyacá, Santanderes, Antioquia y las Islas de San Andrés y Providencia. Los valores más altos (entre 5,5 y 6,0 kW-h/m² por día y en algunos sitios con valores superiores) se presentan en el departamento de La Guajira de norte y sur (Figura 2).

2.5.2 Radiación directa

Sarmiento (2007), la define como la radiación solar que llega a la superficie de la Tierra en forma de rayos provenientes del Sol sin haber sufrido difusión, ni reflexión alguna. Se puede calcular a partir de la siguiente ecuación:

$$H_b = I' = I \sin h$$

Ecuación 6

Donde I' es la componente vertical de la radiación solar directa y h la altura del sol sobre el horizonte. Es evidente que es mayor e igual solamente cuando el Sol se encuentra en el Cenit sobre la superficie de la tierra, el flujo de la radiación directa depende de la Constante solar, la altura del sol sobre el horizonte (h) y la transparencia atmosférica en presencia de gases absorbentes, nubes y niebla. (Figura 7).

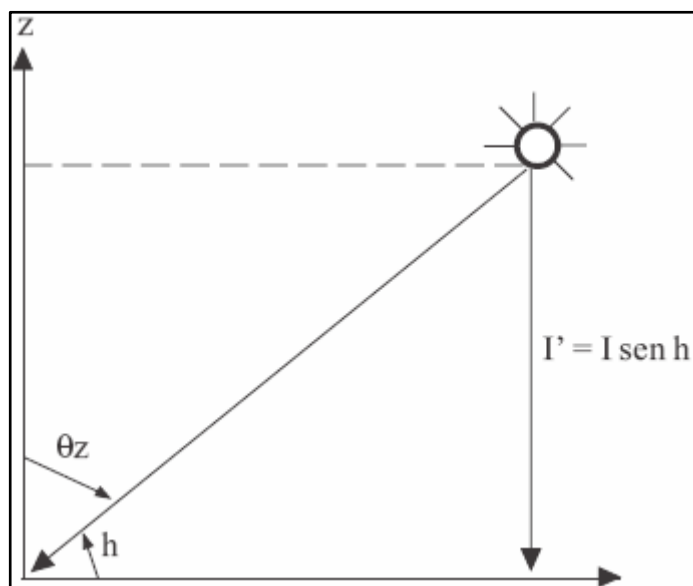


Figura 7 Componente directa de la radiación solar.
(Fuente: IDEAM, 2005)

2.5.3 Radiación difusa

La radiación solar difusa es aquella que se recibe del sol después de haber entrado en contacto con los gases y moléculas presentes en la atmosfera y

sufrir procesos de dispersión, absorción y reemisión. La radiación entrante en la tierra se convierte en difusa debido a diversas circunstancias como la densidad atmosférica, el choque con objetos o partículas presente en la atmosfera, es por esto que el cálculo de esta radiación depende de la nubosidad, pues en días nublados solo hay radiación difusa mas no directa (Sarmiento, 2007; Falcon et al., 2001).

La Agencia Estatal de Meteorología de España y Cabrera et al. (2005), exponen que las nubes es uno de los principales componente de la radiación difusa, debido a que la radiación directa es transformada en radiación difusa por los procesos de transmisión de las nubes y en consecuencia, el porcentaje que incide en un día nublado para una superficie es prácticamente radiación difusa.

La investigación realizada por la Universidad Austral de Chile en 1988, demuestra que los porcentajes de radiación difusa son mayores en los niveles inferiores de un bosque en días claros que en días nublados, debido a que parte de la radiación directa que alcanzo a penetrar el bosque es reflejada por la copas y los troncos transformándola en radiación difusa, lo que permite identificar que el porcentaje de radiación difusa que llega a una superficie se ve condicionado por las características físicas del lugar (Huber et al., 1988).

La energía proveniente de la radiación solar difusa, puede suponer aproximadamente un 15% de la radiación global en los días soleados, pero en los días nublados supone un porcentaje mucho mayor. Para hacerse una idea, en Cáceres, en un día medio de marzo, la energía directa supone $2,09 \text{ Kwh/m}^2$, mientras que la energía difusa es $1,91 \text{ Kwh/m}^2$, es decir, la difusa es un 48% del total, mientras que en un día medio de agosto, la directa supone $6,00 \text{ Kwh/m}^2$, mientras que la difusa es $2,08 \text{ Kwh/m}^2$, en este caso, un porcentaje del 25%. Esto se debe a que en agosto está menos nublado que en marzo (Sobrino, 2000).

2.5.4 Balance radiativo.

El balance radiativo del planeta es un parámetro fundamental ya que determina nuestro clima (Reyes-Coca, 2001). Este balance incluye la energía solar, que es la principal fuente de energía para el planeta, igualmente, la atmósfera y el océano pueden trasladar excesos de energía de una región a otra diferente en el globo (Martínez y Oznaya, 2004). Las partículas en el ambiente tienen un papel importante en la atmósfera, contribuyendo en la formación de gases en el aire por un lado, pero también ayudan a la formación de vapor de agua y de las nubes lo que influyen en el balance radiativo de la tierra (Gallego et al., 2012). Este balance de radiación de acuerdo con Ocampo (2011) está estrechamente

vinculado al ciclo hidrológico; en respuesta a dicho balance, el sistema climático mantiene el equilibrio entre la energía entrante y saliente, mediante el ajuste de sus procesos de precipitación, su temperatura, la evaporación, etc. Por efecto del calentamiento, el forzamiento radiactivo del clima es positivo y ha sido estimado en $1,6 \text{ W/m}^2$, el balance se puede observar en la Tabla 2.

Tabla 2 Balance de radiación en W/m^2 .

ENTRANTE		SALIENTE	
Balance de calor de la superficie de la tierra			
Radiación Solar	170	Radiación Terrestre	390
Radiación Atmosférica	324	Evaporación	80
		Conducción y Convección	24
Total	494	Total	494
Balance de calor de la Atmósfera			
Radiación Solar	70	Radiación al espacio	200
Condensación	80	Radiación a la superficie	324
Radiación Terrestre	390	Radiación de la Tierra al Espacio	40
Conducción	24		
Total	564	Total	564
Valor de Calor Planetario			
Radiación Solar	342	Reflejada y Dispersada	102
		Radiación de atmósfera nubes al espacio	200
		Radiación de la tierra al espacio	40
Total	342	Total	342

(Fuente: IDEAM, 2005)

2.6 Medición y Estimación de la Radiación Solar

La radiación solar se mide en forma directa utilizando instrumentos que reciben el nombre de radiómetros y en forma indirecta mediante modelos matemáticos de estimación que correlacionan la radiación con el brillo solar (IDEAM, 2005). En la actualidad existen muchos equipos destinados a medir y cuantificar la radiación solar global, dentro de los más importantes se encuentran los solarímetros o actinógrafos (heliógrafo), pirheliómetro, pirheliómetro de incidencia normal, fotómetro solar, piranómetro, piranómetro espectral, pirgeómetro y las estaciones meteorológicas (Mendoza 2006). Los radiómetros se pueden clasificar según diversos criterios: el tipo de variable que se pretende medir, el campo de visión, la respuesta espectral, el empleo principal

a que se destina, etc. (Valero-Luna et al., 2010), en la Tabla 3 se presenta un análisis de los equipos y el tipo de radiación medido

Tabla 3 Instrumentos meteorológicos para la medida de la radiación.

Tipo de Instrumento	Parámetro de Medida
Piranómetro	a) Radiación Global, b) Radiación directa, c) Radiación difusa d) Radiación solar reflejada. (usado como patrón nacional)
Piranómetro Espectral	Radiación Global en intervalos espectrales de banda ancha
Pirheliómetro Absoluto	Radiación Directa (usado como patrón nacional)
Pirheliómetro de incidencia normal	Radiación Directa (usado como patrón secundario)
Pirheliómetro (con filtros)	Radiación Directa en bandas espectrales anchas
Actinógrafo	Radiación Global
Pirgeómetro	Radiación Difusa
Radiómetro neto ó piranómetro diferencial	Radiación Neta
Heliógrafo	Brillo Solar

(Fuente: IDEAM, 2005)

Los modelos estadísticos de radiación solar durante muchos años han sido una gran alternativa ante la falta de equipos especializados para medir este fenómeno; uno de los modelos iniciales es el de regresión de Ångström (1924) que relaciona la radiación solar promedio diaria mensual para días claros y la radiación para un lugar dado con el promedio de fracción de las horas de brillo solar medida y la duración teórica del día. (IDEAM, 2005). El modelo paramétrico de Bird & Hulstrom (1981) modificado por Iqbal (1983) computa la radiación difusa y directa y tiene en cuenta la atenuación atmosférica debida a la transmitancia por vapor de agua, aerosoles, mezcla de gases, ozono y dispersión de Rayleigh. El modelo tiene en cuenta el aumento de la transmitancia con la altura donde elige los parámetros de temperatura y humedad correspondientes a la media mensual durante los últimos 50 años derivada de los análisis de NCEP/NCAR (Lucano y Fuentes, 2010).

2.6.1 Modelos físicos detallados (espectrales)

Se basan en la solución de la ecuación de transferencia radiativa, que emplean algoritmos dependientes de la longitud de onda simulando las interacciones físicas reales (cuántica, Rayleigh, Mie y óptica) entre la radiación solar y las molécula y partículas atmosféricas. Estos modelos tienen interés desde el

punto de vista teórico, y también se han empleado como referencia y elemento de comparación para otros modelos menos complejos. El principal inconveniente de este método es la necesidad de datos muy complejos de difícil obtención, aunque existen algunas bases de datos como HITRAN-96 que contienen los datos necesarios. Como ejemplo de modelo físico detallado podemos citar el CPCR2 (Code for Physical Computation of Radiation, 2 bands) (Gueymard, 1989). Rizwan et al. (2010), utilizó el CPCR2 para la estimación de la radiación solar en India, y lo cataloga como uno de los más importantes modelos físicos para la estimación de dicho parámetro, a pesar de que no incluye la absorción del NO₂, el cual es un parámetro de gran importancia en la estimación de la radiación solar.

Cuando se habla de modelo físico se hace referencia al método y los principios para obtener el modelo, consistente en una serie de parametrizaciones basadas en integraciones previas de las funciones de transmitancia espectral a base de tener en cuenta separadamente las fuentes de extinción de la radiación que existen en la atmósfera; entre lo mas importantes está el modelo de Parry Moon, del Instituto de Tecnológico de Massachusetts, elaboró en 1940 un modelo para obtener la irradiancia directa y propuso unas curvas de radiación estándar (Escamilla, 2011).

2.6.2 Modelos paramétricos

Son modelos de complejidad intermedia, que se basan en el conocimiento de variables atmosféricas frecuentemente disponibles o derivables a partir de otros datos como el contenido de vapor de agua, espesor óptico de aerosoles y ozono, visibilidad, etc. Los modelos paramétricos no simulan las interacciones a escala de moléculas o partículas, sino que emplean distintos algoritmos para el cálculo de las transmitancia integrales de los diferentes componentes atmosféricos combinados en distintas formas de la ecuación de transporte, pudiendo representar de forma precisa los efectos de estos componentes sobre la radiación solar. (Escuela Superior de Ingeniero de Sevilla. (s.f.)).

2.6.3 Modelos estadísticos

Investigaciones como las de Bacirki (2009), Togrul (2009), Yorukoglu y Celik (2005), afirman que Ångström propuso una relación lineal entre la proporción global de irradiación (H) para radiación global en días despejados y la proporción de las horas del sol (S) para la duración astronómica del día (S_o , i.e. duración del día).

$$\frac{H}{H_{cl}} = a + (1 - a) \frac{S}{S_o}$$

Ecuación 7

Esta ecuación fue obtenida de los datos mensuales y no puede ser usada para datos diarios.

Ångström determinó, el valor de “a” como 0.25 basados en los datos de Estocolmo. Sin embargo, para estimar (H) de los registros de los datos del sol, el modelo necesita la medición de la radiación global para días completamente claros (H_{cl}). Esta limitación impulsó a Prescott que desarrollo un modelo que estaba en función de la radiación extraterrestre en una superficie horizontal (H_o) en vez de (H_{cl}). Desde H_o es más fácil calcularlo (Bacirki, 2009, Yorukoglu, 2005).

La modificación de la ecuación de Ångström es conocida como la ecuación de Prescott-Ångström.

$$\frac{H}{H_o} = a + b \frac{S}{S_o} \quad \text{Ecuación 8}$$

Los coeficientes del modelo son 0.22 y 0.54 respectivamente determinados por Prescott (Bacirki, 2009, Yorukoglu, 2005), H_o y S_o pueden ser teóricamente calculados. La radiación extraterrestre sobre una superficie horizontal puede ser calculada de la siguiente forma.

$$H_o = \frac{(24)(3600)}{\pi} G_{sc} k (\cos \phi \cos \delta \sin \omega_s + \frac{\pi \omega_s}{180} \sin \phi \sin \delta) \quad \text{Ecuación 9}$$

Donde G_{sc} es la constante solar (1367 W/m^2) y k es la corrección de la constante.

$$k = 1 + 0.033 \left(\cos \frac{360 n}{365} \right) \quad \text{Ecuación 10}$$

Donde n es el número de días del año empezando desde el primero de enero. La declinación δ puede ser obtenida por la ecuación de Cooper (1969).

$$\delta = +23.45 \sin \left(360 \frac{284 + n}{365} \right) \quad \text{Ecuación 11}$$

El ángulo horario del sol ω_s puede ser calculado de la ecuación de Cooper, (1969).

$$\omega_s = \cos^{-1} (-\tan \phi \tan \delta) \quad \text{Ecuación 12}$$

Donde ϕ es la latitud del lugar. La longitud del día S_o puede ser calculada por la siguiente ecuación (Iqball 1983).

$$S_0 = \frac{2\omega_s}{15}$$

Ecuación 13

La relación entre la fracción (H_G/H_0) y la duración de las horas de sol (S/S_0) están dadas por la siguientes relaciones.

El modelo lineal de Prescott-Angström's.

$$\frac{H_G}{H_o} = a + b \frac{S}{S_o}$$

Ecuación 14

Modelo cuadrático (Ögelman et al., 1984).

$$\frac{H_G}{H_o} = a + b \left(\frac{S}{S_o} \right) + c \left(\frac{S}{S_o} \right)^2$$

Ecuación 15

Modelo cúbico (Samuel, 1991).

$$\frac{H_G}{H_o} = a + b \left(\frac{S}{S_o} \right) + c \left(\frac{S}{S_o} \right)^2 + d \left(\frac{S}{S_o} \right)^3$$

Ecuación 16

Donde a, b, c y d son coeficientes de correlación.

Benghamem et al. (2009), establece las relaciones entre la irradiación global, temperatura y la humedad relativa, las cuales se definen en la siguientes ecuaciones.

$$\frac{H_G}{H_o} = a_1 + b_1 \left(\frac{T}{T_{\max}} \right)$$

Ecuación 17

Donde:

T: Temperatura

T_{\max} : Temperatura máxima

a_1, b_1 : Coeficientes de correlación

$$\frac{H_G}{H_o} = a_1 + b_1 \left(\frac{HR}{HR_{\max}} \right)$$

Ecuación 18

Donde:

a_1, b_1 : coeficientes de correlación.

HR: Humedad Relativa

HR_{max} : Humedad Relativa Máxima

2.6.4 Modelos estadísticos de regresión

Por último, investigaciones previas Sarsah & Uba (2013), Jin et al. (2005), plantean modelos de regresión permiten determinar la radiación solar directa a partir de variables de entrada como velocidad y dirección del viento, radiación solar, temperatura ambiente y horas de sol etc., sin emplear un algoritmo para el cálculo de transmitancia.

Bakirci (2007), Jin et al. (2005), Almorox et al. (2011), obtuvieron a partir de estas variables de entrada, correlaciones que permitieron determinar modelos que se ajustan a las estimaciones de la radiación solar calculadas mediante modelos estadísticos como el de Ångström previamente explicados. La validez de estos modelos es su principal desventaja, se debe a sus limitaciones temporales y geográficas. (ETSI, 2003).

3 OBJETIVOS

3.1 Objetivo General

4.1.1. Estimar la Radiación Solar a partir de las condiciones meteorológicas del Distrito de Barranquilla mediante un modelo.

3.2 Objetivos Específicos

4.2.1. Analizar la variación de las condiciones meteorológicas del Distrito de Barranquilla.

4.2.2. Determinar la relación de cada variable meteorológica con los valores de radiación solar.

4.2.3. Establecer el modelo que estime con el mejor ajuste la radiación solar del distrito a partir de las condiciones meteorológicas.

4 METODOLOGÍA

4.1 Área de Estudio

4.1.1 Localización general

El área de estudio corresponde al Distrito de Barranquilla localizado en el vértice nororiental del departamento del Atlántico, sobre la orilla occidental del río Magdalena, a 7,5 km de su desembocadura en el mar Caribe. Barranquilla se encuentra a una latitud $10^{\circ} 59' 16''$ al norte de la línea ecuatorial y una longitud de $74^{\circ} 47' 20''$ al occidente de Greenwich, tomando como referencia la plaza de la Paz, punto cero de la ciudad.

Barranquilla es un centro industrial de primer orden. La actividad económica es dinámica y se concentra principalmente en la industria, el comercio, las finanzas, los servicios y la pesca. Entre los productos industriales se tienen las grasas vegetales y aceites, productos farmacéuticos, químicos, industriales, calzado, carrocerías para buses, productos lácteos, embutidos, bebidas, jabones, materiales para la construcción, muebles, plásticos, cemento, partes metalmecánicas, prendas de vestir y embarcaciones (Alcaldía de Barranquilla, 2013), La estación meteorológica se encuentra ubicada en las coordenadas: $10^{\circ}59'44.61''N$ y $74^{\circ}47'26.38''O$ (Figura 8).



Figura 8 Localización del proyecto.
(Fuente: Google Earth).

4.1.2 Climatología

Para el presente estudio aplican las condiciones climatológicas del Distrito de Barranquilla. El clima de la ciudad de Barranquilla es cálido y muy húmedo. Por su topografía relativamente plana, con alturas que no sobrepasan los 200 msnm, las masas húmedas provenientes del océano no alcanzan a precipitarse en la región; sin embargo, la temperatura ambiental es suavizada por el sistema de vientos. Los valores de otros factores climatológicos de interés son mostrados en la Tabla 4 (IDEAM, 2005).

Tabla 4 Factores climatológicos de interés.

Factor	Máxima	Mínima	Promedio
Temperatura	31 °C	23,3 °C	27,1 °C
Humedad	84%	77%	85%

Fuente: IDEAM, 2005

4.2 Recuperación de la Información Meteorológica



Figura 9 Estación meteorológica.

A fin desarrollar el proyecto se ubicó una (1) estación meteorológica en la azotea del bloque 9 de la Universidad de la Costa para la medición de los parámetros de interés. La estación utilizada es marca Davis Vantage Pro2 y serie A71025N564 (Figura 9), instalada a una altura de 44 msnm, la cual cuenta con un conjunto Integrado de Sensores (ISS) sensor #6372 para la medición temperatura, sensor #6382 para humedad relativa, sensor #6452 para la medición de la radiación solar. La captura de los datos arrojados fue almacenada en un datalogger C11227C70 marca DAVIS. El muestreo se realizó por un periodo de cuatro (4) meses corresponden al periodo comprendido entre el 23/05/2013 y el 02/10/2013, registrando la lectura de los

parámetros en un intervalo de 5 minutos, estimando una cantidad de 30.921 datos por cada parámetro, en la Figura 9 se puede observar la estación armada en la y ubicada en el lugar destinado para efectuar las mediciones. y Figura 10 se observan los accesorios de la estación empleada

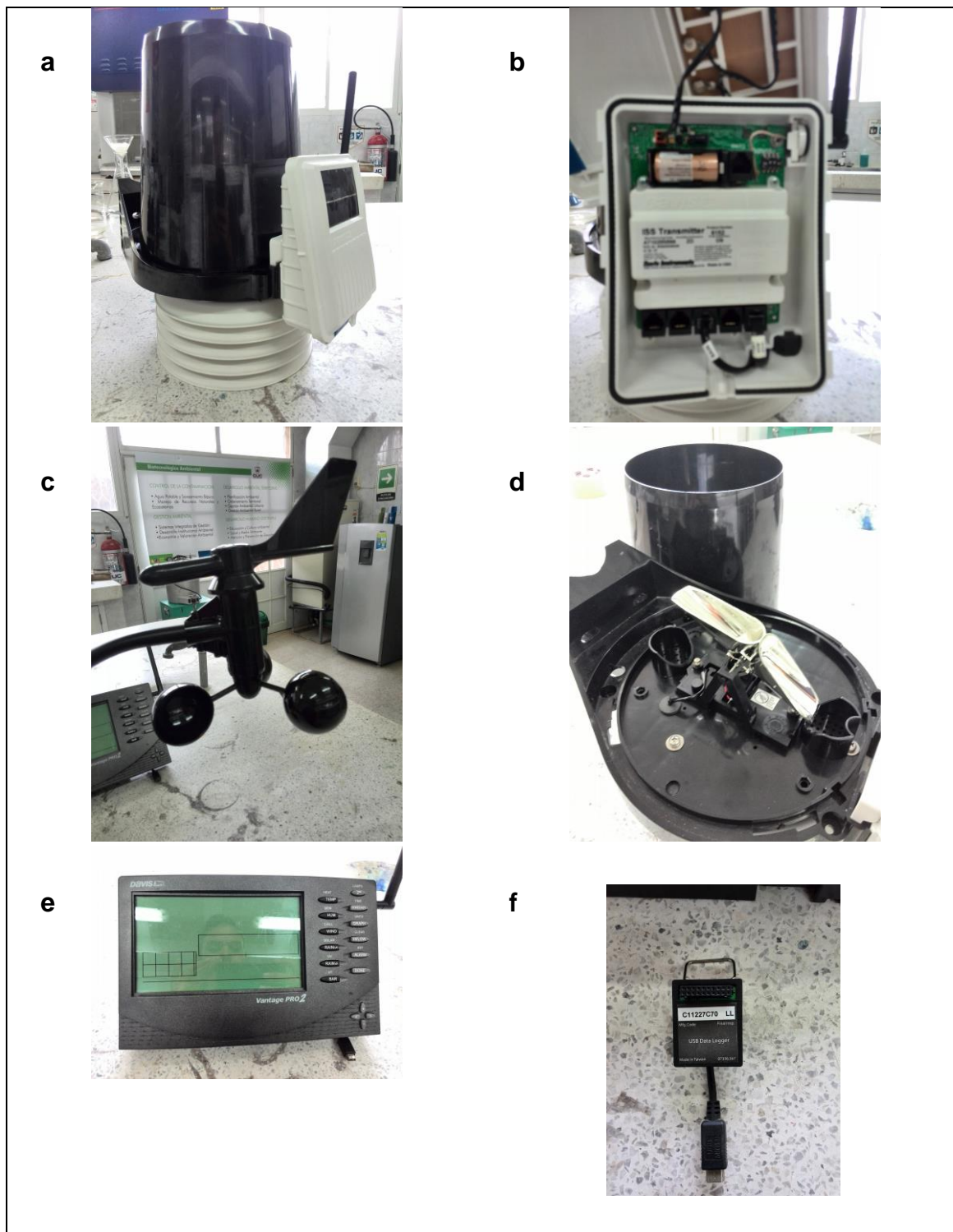


Figura 10 Accesorios y componentes de la estación meteorológica.
a) Vista frontal de la estación, b) panel solar c) anemómetro y veleta d) pluviómetro automático e) Consola central vantage pro 2 f) datalogger de la consola.

Una vez obtenida la información meteorológica se procedió a ordenarla y tabularla a fin de obtener las parejas de datos usadas para los análisis estadísticos. Las horas de sol reales u horas de sol medida fueron calculadas tomando la hora de la primera medida de la radiación solar y la hora del último registro de esta misma variable, mientras que las horas de sol teóricas fueron calculadas con la Ecuación 13 referenciada en el marco teórico; para el caso de la radiación solar extraterrestre se hizo el cálculo usando la Ecuación 9 también referenciada en el marco.

4.3 Análisis Estadístico

4.3.1 Análisis de las series de tiempo

Para el análisis de las series de tiempo se realizaron anovas simples de tiempo con cada una de las variables meteorológicas de interés, con el fin de analizar el comportamiento de las variables y si existe una diferencia entre ellas a lo largo de la variable tiempo, así mismo poder establecer los estadísticos descriptivos.

4.3.2 Estimación del modelo estadístico

Para la selección del modelo se procedió a plantear dos grupos de tratamiento, el primero lo establecen las regresiones simples y multivariantes entre la radiación solar global y las variables meteorológicas (temperatura, humedad relativa y tiempo), según lo expuesto en los trabajos realizados por Sarsah y Uba (2013), Almorox et al. (2011), Bacirki (2009), Togrul (2009), Wu et al. (2007), Yorukoglu y Naci (2006). Obteniendo un total 8 regresiones como se muestran en la Tabla 5.

El segundo grupo de tratamiento se corresponde a los modelos estadísticos o el grupo de regresiones linealizadas entre la razón de proporción de la radiación solar extraterrestre y la medida, comparada con la razón de cambio establecida por la horas del sol (medida y la teórica), la temperatura (horaria y la máxima de cada día), y la humedad relativa (horaria medida y la máxima de cada día).

En total se establecieron seis ecuaciones para este segundo tipo de tratamiento, la primera es la sugerida por Ångström-Prescott (ver Ecuación 14) y modificada por Gueymard et al. (1989), la segunda es la ecuación cuadrática planteada por Ögelman et al. (1984) (Ver Ecuación 15). La ecuación cubica planteada por Samuel (1991) fue la tercera (Ver Ecuación 16), la cuarta ecuación es la logarítmica planteada por Ampratwum and Dorvlo (1999), las dos últimas ecuaciones son las expuestas por Benghaneim et al (2009) quien

relaciona la irradiación global y en la segunda ecuación relaciona la humedad relativa y la irradiación global.

Tabla 5 Regresiones lineales simples y multivariantes.

Tipo de Regresión	Función	Significado de las variables
Simple	$f\{t, H\}$	Tiempo (t), Radiación Solar (H)
	$f\{HR, H\}$	Humedad Relativa (HR), Radiación Solar (H)
	$f\{S, H\}$	Horas de Sol (S), Radiación Solar (H)
	$f\{T, H\}$	Temperatura (T), Radiación Solar (H)
Combinadas (Dos entradas)	$f\{t, HR; H\}$	Tiempo (t), Humedad Relativa (HR); Radiación Solar (H)
	$f\{T, HR; H\}$	Temperatura (T), Humedad Relativa (HR); Radiación Solar (H)
	$f\{t, T; H\}$	Tiempo (t), Temperatura (T); Radiación Solar (H)
Combinada total	$f\{t, HR, T; H\}$	Tiempo (t), Humedad Relativa (HR), Temperatura (T); Radiación Solar (H)

5 RESULTADOS

5.1 Serie de Tiempo para las Condiciones Meteorológicas

En esta sección de los resultados se analizaron las variaciones que presentan las mediciones de las condiciones meteorológicas a lo largo de los meses de muestreo, en ellas se tuvo en cuenta la variación intrínseca de las medias horarias, al tiempo que se establece el comportamiento diario de la variable.

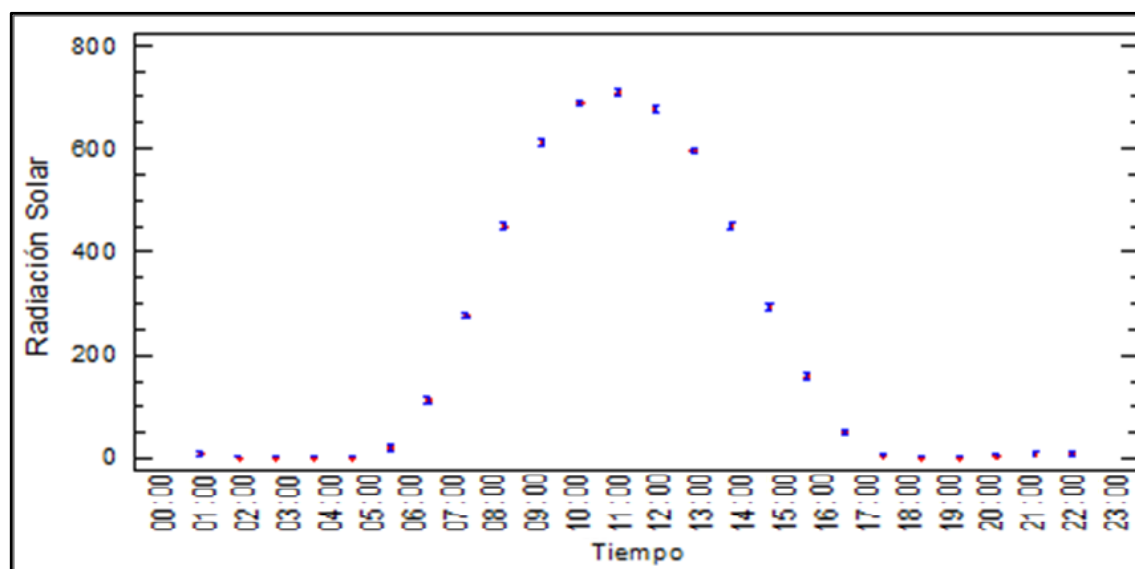


Figura 11 Medias de horarias para la Radiación Solar.

En cuanto a los datos de radiación solar se observa poca dispersión para cada una de las medidas dentro de un mismo grupo de hora del día a lo largo de los 4 meses de muestreo; esto se evidencia en el hecho que la desviación estándar promedio es de 305,5, las hora reportada con mayor variabilidad es la de 12:00 h y la de menor variación es 19.00 h. No obstante si se observa el conjunto de datos de manera global las medias horarias presentan una alta variabilidad, los valores más altos de radiación se presentan entre las 9:00 h y las 15:00 h (Figura 11), en un rango de valores donde el inicial es de 1 W/m^2 hasta un valor máximo de 1208 W/m^2 reportado el día 25/05/2013 a las 12:05 h. En promedio la radiación solar observada fue de $409,3 \text{ W/m}^2$; según los datos frecuentemente las mediciones para la radiación solar inician en los intervalos de las 5:30 – 5:40 h y terminan en los intervalos de las 18:00 – 18:20 h.

Siguiendo con la misma dinamica, el analisis para la humedad relativa reportó un comportamiento similar al parametro anterior, poca variabilidad en los datos para cada hora medida durante el periodo de muestreo, el dato máximo es de 95% reportado el día 02/07/2013 entre las 06:45 – 07:00 h y el dato minimo es de 57% entre las 11:25 – 12:05 reportado el 23/08/2013; el promedio horario de humedad relativa es del 81%. En la Figura 12 se presenta el

comportamiento diario de la humedad relativa, observandose un desenso en la durante el perido comprendido entre las 07:00 – 12:00 h que coincide con el reporte de los datos minimos para este parámetro. Según el analisis estadistico se reporta que la hora de mayor variación es 5:00 h y la de menos varaición es 20:00 h y se presentan 14 grupos homogenios, reportando los mayores grupos homogenios en los intervalos de tiempo de las 22:00 h hasta las 05:00 h. Los datos registrados para la humedad relativa presentan una desviación estandar de 7,1.

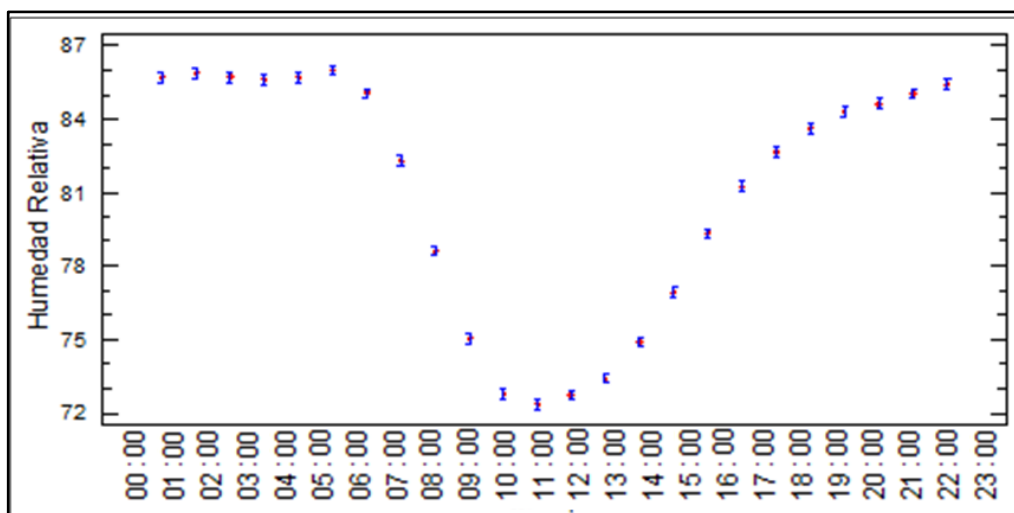


Figura 12 Medias horarias de humedad relativa.

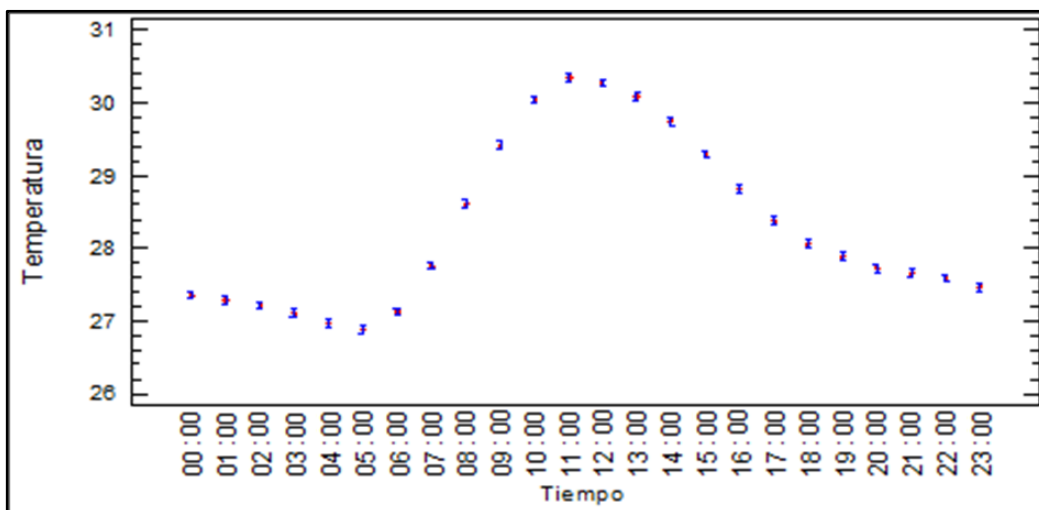


Figura 13 Medias horarias de temperatura.

Ahora, los datos de temperatura presentan poca dispersión en las medias horarias medidas a lo largo de los cuatro meses, como se observa en la Figura 13, Las horas que presentan los valores más elevados de temperatura están entre las 09:00 a 15:00 h. En promedio la temperatura registrada fue de 28,3 °C con un reporte máximo de 34,5 °C el día 02/10/2013 a las 12:35 h y una temperatura mínima de 21,7 °C registrada el día 28/09/2013 a las 20:15 h. A

diferencia de las gráficas anteriores se está grafica presenta mucha más variación, se reportan 18 grupos homogenios observandose los más grandes en los intervalos de 20:00 h a las 07:00 h y las horas con mayor y menor varaición respectivamente son las 05:00 h y 19:00 h; para ese conjunto de datos se presenta una desviación de 1,45.

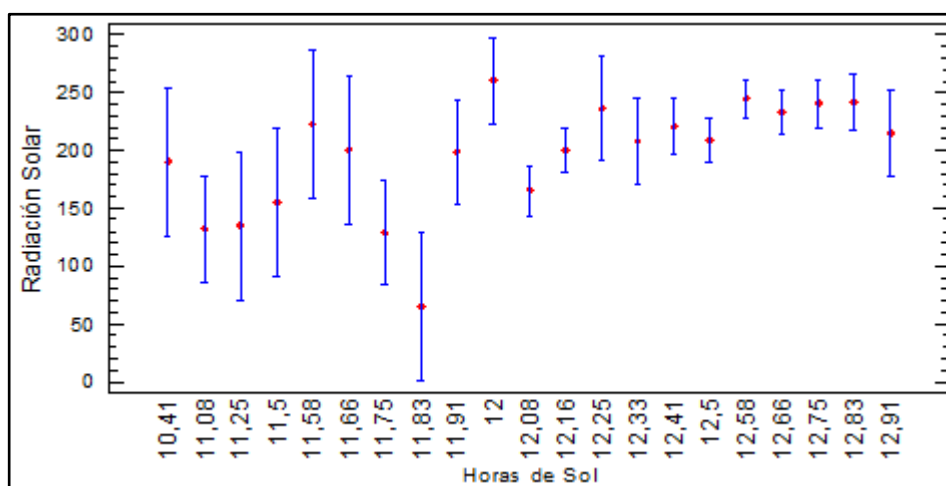


Figura 14 Medias de la radiación solar por horas de Sol.

Para el caso de la las horas de sol, la variable tiempo cambia pues se toma como variable el día y no las horas que era el caso de los anteriores análisis; los días con mayor horas de sol fueron el 05/06/2013 – 05/07/2013 – 13/07/2013 reportando 13,5 h de sol y el día con menos hora reportada fue el 06/09/2013 reportando 10,7 h de sol, en promedio se reporta 12,6 h de horas de sol. El análisis múltiple de rangos entre las variables presenta 47 parejas con una diferencia significativa de correlación lo cual confirma lo planteado anteriormente. En la Tabla 6 se muestra el resumen de los análisis de tiempo anteriormente detallados.

Tabla 6 Resumen de los análisis de tiempo de las variables meteorológicas.

Parámetro	Rango	Media Horaria	P- Valor ANOVA ^a	Grupos Homogéneos Formados ^b
Horas de Sol	10,4 – 12,9	12,4	P-Valor (0.00)	3
Humedad Relativa	57,0 – 95,0%	81,00%	P-Valor (0.00)	16
Temperatura	25,6 – 32,1 °C	28,2 °C	P-Valor (0.00)	18
Radiación Solar	1,0 – 1208,0 W/m ²	214,0 W/m ²	P-Valor (0.00)	13

^a P-crítico (0.05); Si P-valor es menor que P-crítico existe una diferencia estadísticamente significativa entre la media del parámetro entre un nivel de hora y otro con un nivel de confianza de 95%. ^b establecido por los procedimientos de diferencia mínima significativa (LSD).

5.2 Modelos de Estimación (Grupo 1 regresiones no linealizadas)

5.2.1 Regresiones simples

Las regresiones simples se realizaron con el fin de verificar la ecuación mas sencilla posible y de mejor ajuste, así como tipo de correlación existente entre las variables. Previo al establecimiento y ejecución de las regresiones, se realizó un análisis de multicolinealidad entre las variables alternas mediante el factor de inflación de la varianza (VIF), se obtuvo un promedio de 3,351; indicando que no presenta multicolinealidad. Es decir, que los parámetros empleados como regresores, no se ven correlacionados o no depende entre ellos. Finalmente el análisis de Pearson demostró que todas las variables meteorológicas y la hora del día, tienen el mismo nivel de correlación establecidos con un nivel de significación $P < 0,01$; estableciendo una relación inversa con la temperatura y el tiempo (hora), mientras que con la humedad relativa y la horas de sol, se establece positiva. A continuación se presentara los resultados de las regresiones para cada ecuación identificando el R y R^2 de cada una y otras características de interés dentro del análisis de los resultados.

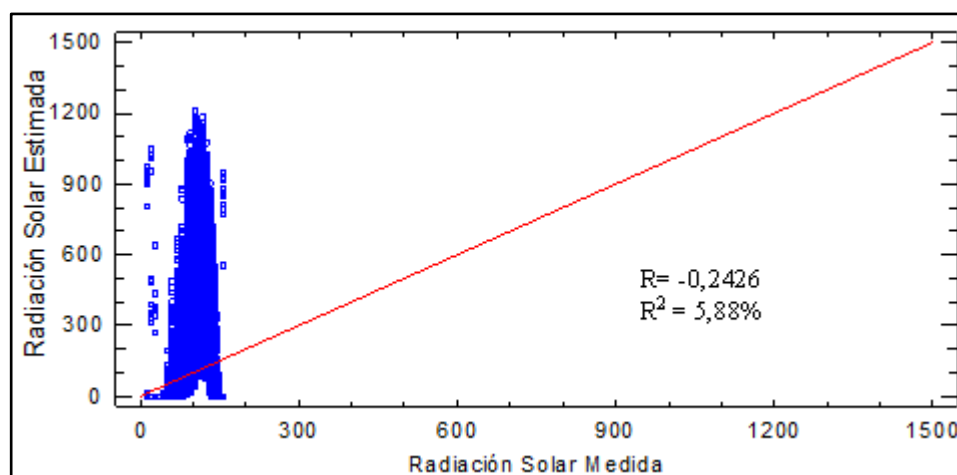


Figura 15 Comparación de la radiación solar medida y modelada en la regresión simple - tiempo y la radiación solar.

Para la regresión aplicada entre las horas del día y la radiación solar (Figura 15) se presenta un coeficiente R de -0,243 argumentando una relación inversa entre las variables, así mismo si observamos los datos estimados por el modelo se evidencia una mayor variabilidad de los datos esperados con relación a los registros medidos, esto se puede deber a la baja apareabilidad de los datos soportados por un coeficiente R^2 de 5,9%; adicionalmente a esto se presenta un error medio absoluto (MAE) de 249,466 soportando la poca correlación entre el conjunto de datos graficado. Toda esta información es coherente con el modelo que presenta el mejor ajuste para el conjunto de datos que es el modelo de $y = (\beta_0 + \beta_1 \cdot x^2)^2$.

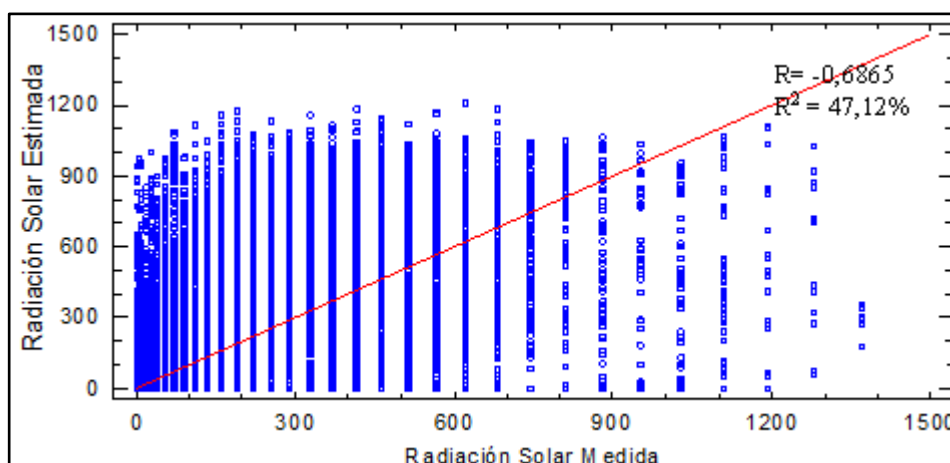


Figura 16 Comparación de la radiación solar medida y modelada en la regresión simple - humedad relativa y radiación solar.

Para el caso de la regresión aplicada entre la humedad relativa y la radiación solar se muestra un coeficiente de R de -0,687 indicando una relación inversa entre las variables estadísticamente significativas, corroborado con un coeficiente R^2 de 47,1%. Así mismo, siguiendo con el análisis anterior el modelo de ajuste presenta una mayor dispersión de los datos, no obstante la relación de proporcionalidad entre la variación de los datos medidos y estimados es menor, presentando un error medio absoluto de 169,144. En la Figura 16 se pueden observar los datos observados y predichos por el modelo $y = (\beta_0 + \beta_1 \sqrt{x})^2$.

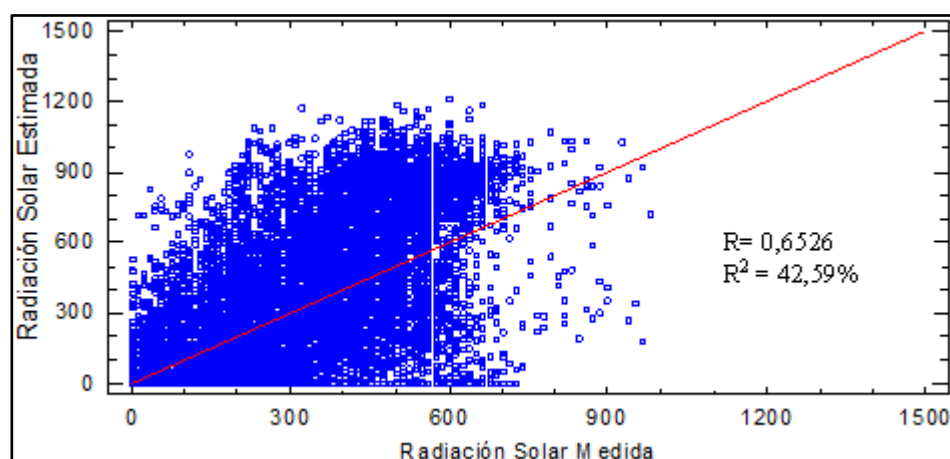


Figura 17 Comparación de la radiación solar medida y modelada en la regresión simple - temperatura y radiación solar.

Posteriormente en la Figura 17 se presenta la regresión de temperatura contra la radiación solar, en la que se evidencia un coeficiente de R de 0,653 lo que indica una relación directa con la radiación solar corroborado con un coeficiente R^2 de 42,6%, presentando una mayor dispersión hacia lo estimado. El modelo

de $y = \beta_0 + \beta_1 x^2$ presenta el mejor ajuste para este conjunto de datos con un error medio absoluto de 186,975.

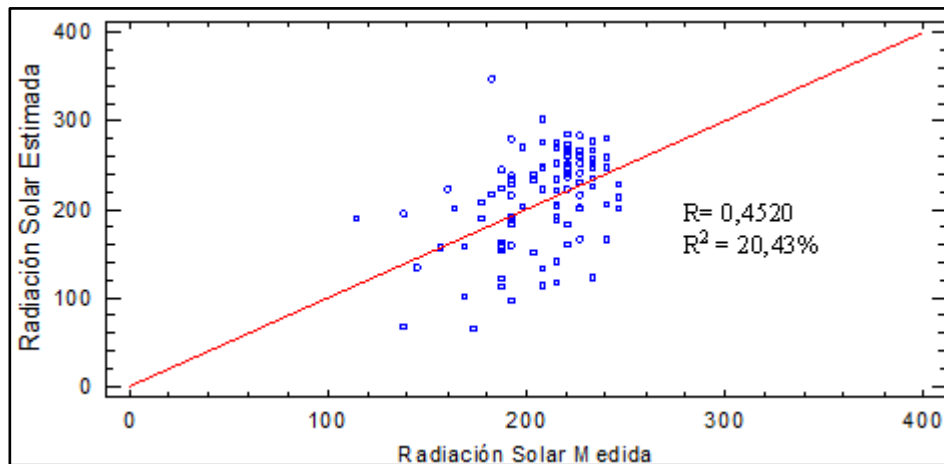


Figura 18 Comparación de la radiación solar medida y modelada en la regresión simple - horas de sol y radiación solar.

Para el caso de la regresión simple entre las horas de sol y la radiación solar (Figura 18) se muestra una baja correlación entre las variables como lo evidencia el coeficiente R de 0,452 que si bien indica una relación directa entre las variables no representa una alta correlación entre las mismas; corroborado por un coeficiente de R^2 de 20,4%, esto se puede atribuir a la poca variabilidad de las horas de sol, correspondiente al periodo en el cual se tomaron los datos de la muestra. Para este grupo de datos el modelo que presento mejor ajuste fue el de $y = e^{(\beta_0 + \beta_1 x^2)}$ que es 1,2% mayor que el modelo lineal, en cuanto al error absoluto medio para este conjunto de datos es de 38,169.

En la Tabla 7 se muestra el resumen de los coeficientes R, R^2 para cada regresión, el modelo de mejor ajuste y el error medio absoluto (MAE) que corrobora la relación para cada una de las variables.

Tabla 7 Resumen de las regresiones simple.

Función	Coeficiente R	Coeficiente R^2	Error Medio Absoluto (MAE)	Modelo de Mejor Ajuste
$f\{t, H\}$	- 0,243	5,9%	249,466	$y = (\beta_0 + \beta_1 * x^2)^2$
$f\{HR, H\}$	- 0,687	47,1%	169,144	$y = (\beta_0 + \beta_1 \sqrt[2]{x})^2$
$f\{T, H\}$	0,653	42,6%	186,975	$y = \beta_0 + \beta_1 x^2$
$f\{S, H\}$	0,452	20,4%	38,1689	$y = e^{(\beta_0 + \beta_1 x^2)}$

5.2.2 Regresiones múltiples

En el presente ítem se muestran los resultados de las regresiones multivariantes de la forma que evidencia la Ecuación 20 entre la radiación solar

global y las variables meteorológicas (temperatura, humedad relativa y hora del día).

$$Y = \beta + \beta_2 x_2 + \beta_3 x_3 + \dots \beta_n x_n \quad \text{Ecuación 19}$$

En relación a la regresión múltiple entre $f\{t, HR; H\}$ se evidencia un coeficiente R^2 de 46,5% lo cual indica un alto grado de apareamiento entre la radiación solar y las dos variables independientes humedad relativa y tiempo, el error medio absoluto es de 164,244 la gráfica que muestra la dispersión de datos entre las variables está representada en la Figura 19.

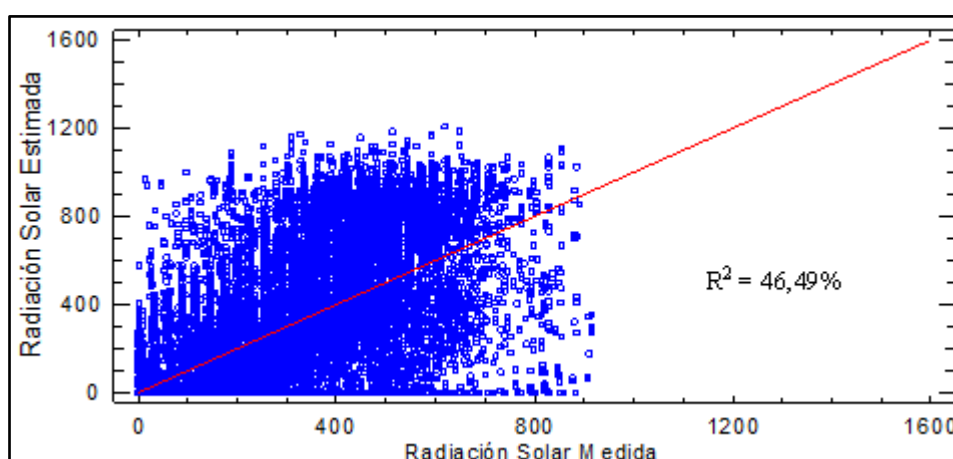


Figura 19 Comparación de la radiación solar medida y modelada en la regresión múltiple - Tiempo, humedad relativa y radiación solar.

Mientras que para el caso de la regresión múltiple entre $f\{T, HR; H\}$ se muestra un coeficiente R^2 de 47,1%, evidenciando un grado de apareamiento la radiación solar y las dos variables independientes humedad relativa y temperatura. El error medio absoluto del conjunto de datos fue de 170,102 en la Figura 20 se muestra la gráfica que representa la dispersión de los datos analizados.

Para el caso de la regresión múltiple entre $f\{T, t; H\}$ se presenta un grado de afinidad entre la radiación solar y las dos variables independiente tiempo y temperatura corroborado con un R^2 de 42,7% y un error medio absoluto de 180,77. La gráfica que muestra la dispersión entre las variables es la Figura 21 que muestra una mayor dispersión hacia lo estimado que hacia lo medido; lo valores oscilan entre 0 – 1000 para lo estimado mientras que para el predicho entre 0 – 900.

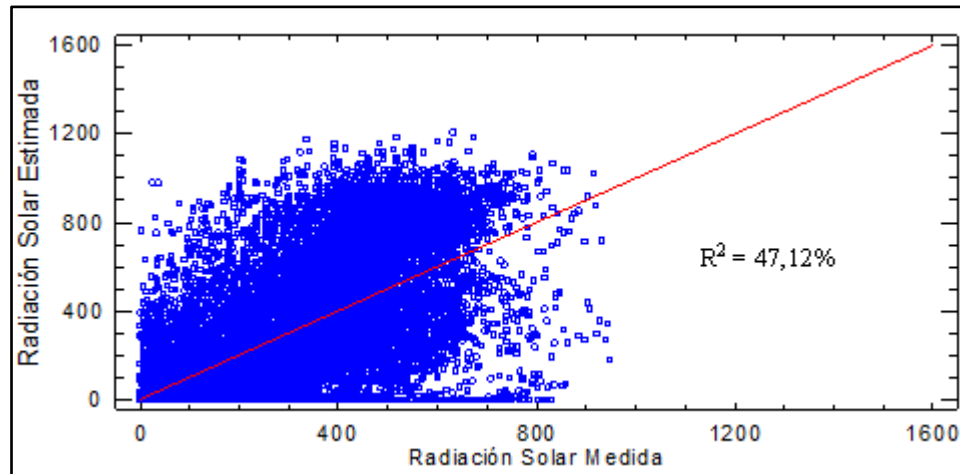


Figura 20 Comparación de la radiación solar medida y modelada en la regresión múltiple - temperatura, humedad relativa y radiación solar.

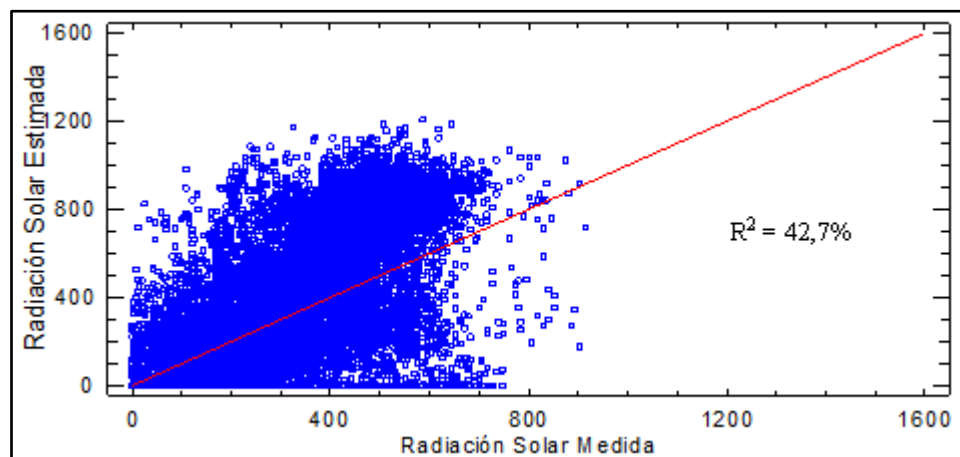


Figura 21 Comparación de la radiación solar medida y modelada en la regresión múltiple - temperatura, tiempo y radiación solar.

Para el caso de la regresión entre $f\{HR, T, t; H\}$ se observa un coeficiente de correlación R^2 de 48,5% y un error medio absoluto de 164,085 lo cual indica una amplia relación las tres variables independientes y la variable dependiente, tal como se evidencia en la Figura 22 el conjunto de datos tiende más hacia lo estimado que hacia lo medido.

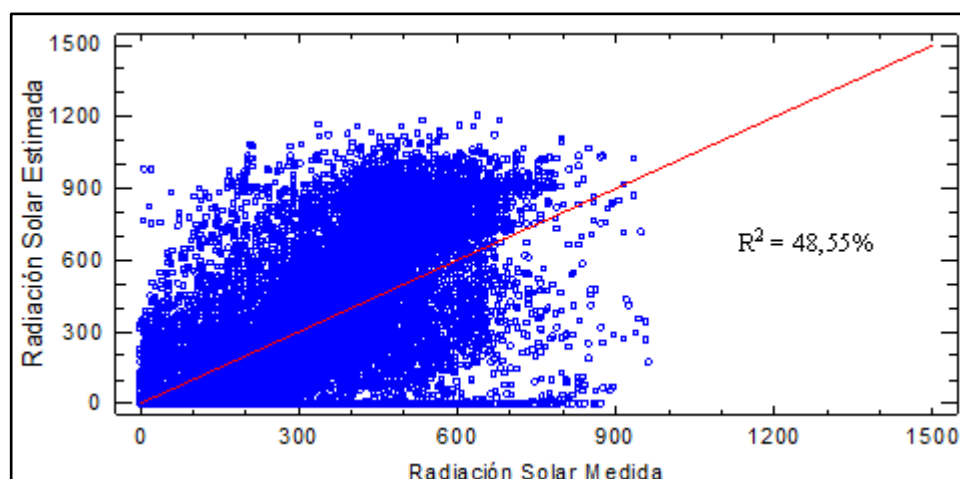


Figura 22 Comparación de la radiación solar medida y modelada en la regresión múltiple - temperatura, humedad relativa, tiempo y radiación solar.

En general los datos demuestran una buena correlación entre ellos, sin embargo la serie de datos que presento la mejor correlación fue la correspondiente a $f\{HR, T, t; H\}$, para corroborar todos estos resultados en la Tabla 8 se observa el resumen de cada uno de los factores por grupos analizados.

Tabla 8 Resumen de las regresiones compuestas.

Función	Coeficiente de la Ecuación				R^2	Error Absoluto Medio (MAE)
	$\beta_1 (t)$	$\beta_2 (RH)$	$\beta_3 (T)$	$\beta_0 (cte.)$		
$f\{t, HR; H\}$	-4,401	-29,031	-	2617,66	46,5%	164,244
$f\{t, T; H\}$	-5,93	-	113,43	-2927,5	42,7%	180,770
$f\{RH, T; H\}$	-	-1994,9	41,51	656,26	47,1%	170,100
$f\{T, HR, t; H\}$	-5,25	-19,33	46,72	519,52	48,6%	164,100

5.3 Modelos Estadísticos (Grupo 2 regresiones linealizadas)

Para el caso de los modelos estadísticos se presentan menos datos en las gráficas si se comparan con las regresiones simples o compuestas, esto debe al hecho que para estos análisis se tomaron los datos diarios y no los horarios como era el caso de los análisis anteriores; en este orden de ideas se efectuaron las regresiones estadísticas desarrolladas por Angström-Prescott, 1924, entre otros al conjunto de datos, para validar la posible ecuación que permita estimar la radiación solar e identificar el modelo de mejor ajuste. De la Figura 23 a la Figura 27 se presentan las regresiones realizadas y las ecuaciones efectuadas.

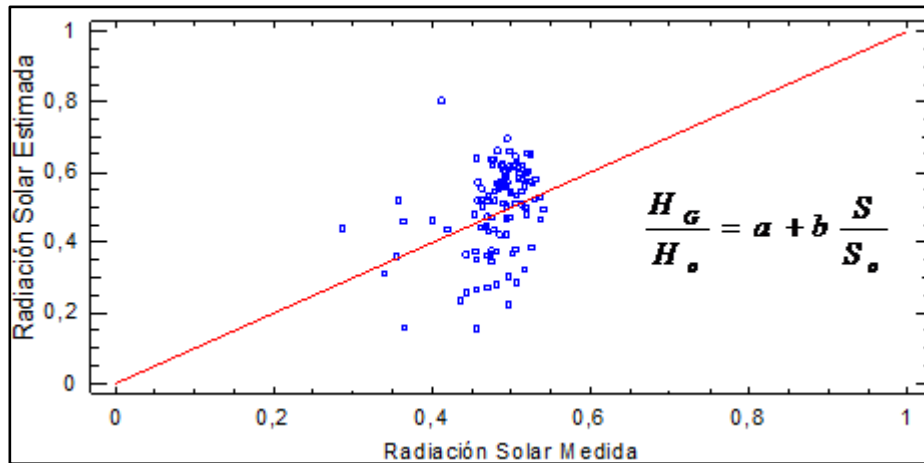


Figura 23 Comparación de la radiación solar medida y modelada por la ecuación de Angström-PreScott.

Para la modelo estadístico lineal planteado por Angström-PreScott (ver Figura 23) que relaciona la radiación solar con las horas de sol, da como resultado una mayor distribución de los datos hacia lo estimado por el modelo con un rango de 0,19 a 0,82, mientras que en lo medido los datos se concentran en el rango de 0,30 a 0,55. El modelo presenta un R de 0,333 lo que indica una relación directa y un R^2 de 11,1% lo cual indica una relación relativamente débil entre las variables. Según el análisis estadístico se presenta un MAE de 0,209 presentando una fuerte relación entre las variables y menor diferencia entre lo medido y lo estimado.

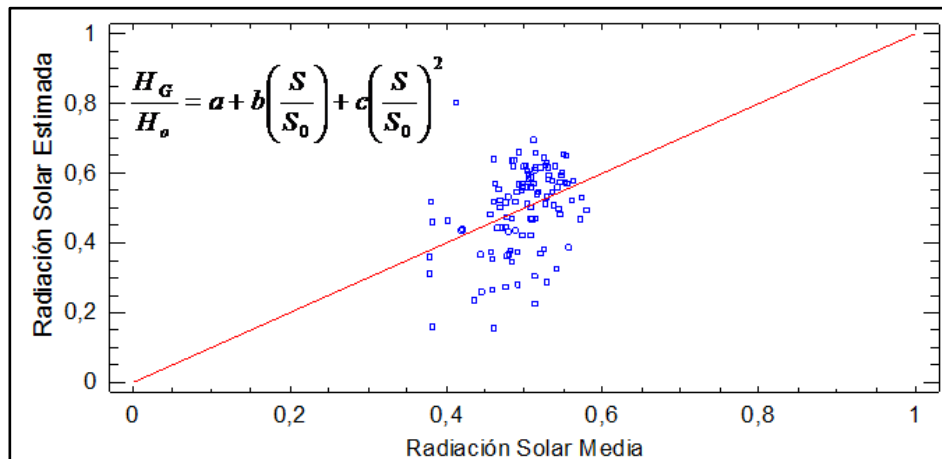


Figura 24 Comparación de la radiación solar medida y modelada por la ecuación de Ögelman et al. (1984).

En cuanto al modelo planteado por Ögelman et al (1984), que relaciona la radiación solar medida y la radiación estimada con la duración de las horas de sol reales y las calculadas; se puede apreciar mayor distribución hacia lo estimado, observando datos desde 0,2 hasta 0,8. En el modelo se presenta un coeficiente de correlación R^2 de 11,0%, para este caso el MAE es de 164,085

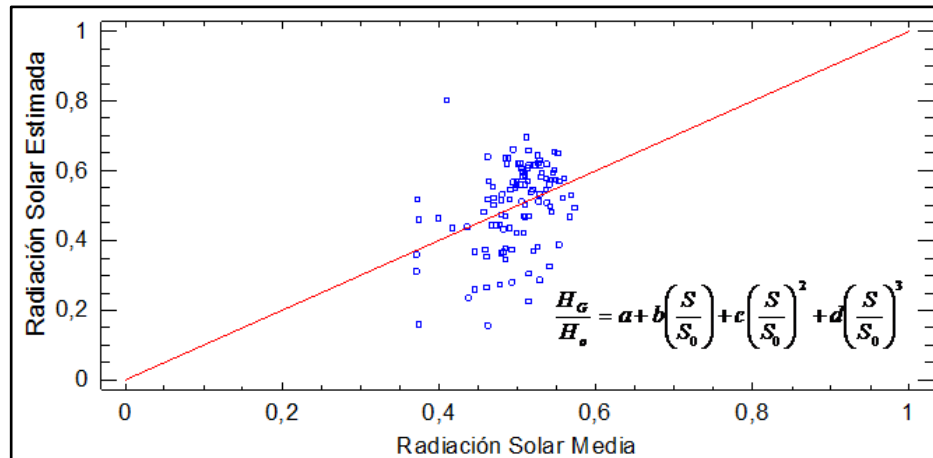


Figura 25 Comparación de la radiación solar medida y modelada por la ecuación de Samuel (1991).

Para el Modelo estadístico exponencial de tercer orden que relaciona la razón de proporcionalidad de la radiación solar con la razón de cambio entre las horas de sol teóricas y medidas, muestra una mejor distribución de los datos hacia lo estimado en un rango que oscila entre 0,19 a 0,82, mientras que lo reportado por la estación se mueve en el rango de 0,38 a 0,59. Para el modelo se presenta una R^2 de 10,2% y un MAE de 0,090 indicando una relación débil entre las variables presentadas para el modelo.

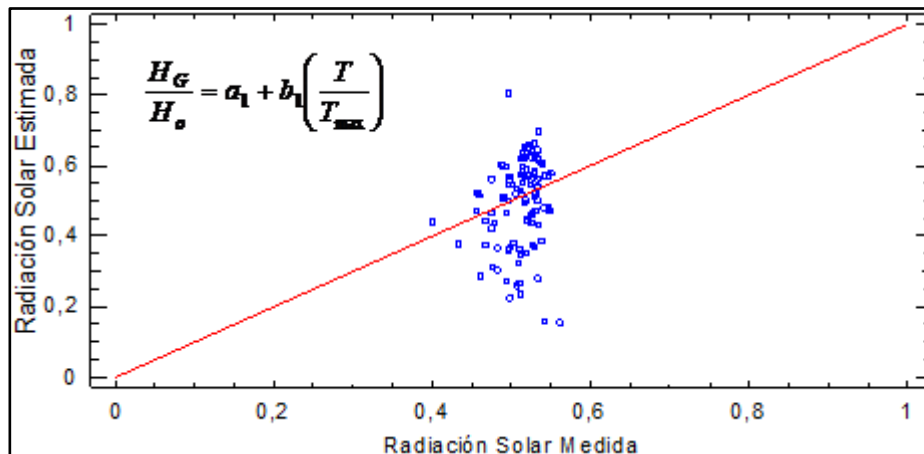


Figura 26 Comparación de la radiación solar medida y modelada por la ecuación de temperatura por Benghamen et al. (2009).

Para el modelo estadístico que relaciona la razón de proporcionalidad de la radiación solar y la temperatura, se muestra una mejor distribución tendiente a lo estimado por el modelo con un rango de datos que oscila entre 0,18 a 0,81, mientras que para lo medido se concentran en el rango de 0,4 a 0,56. Presenta un R de -0,227 asociado a una relación inversa entre las variables, pero con un bajo nivel de correlación de los datos, ratificado por un R^2 de 5,2%. En cuanto al MAE que es de 0,089.

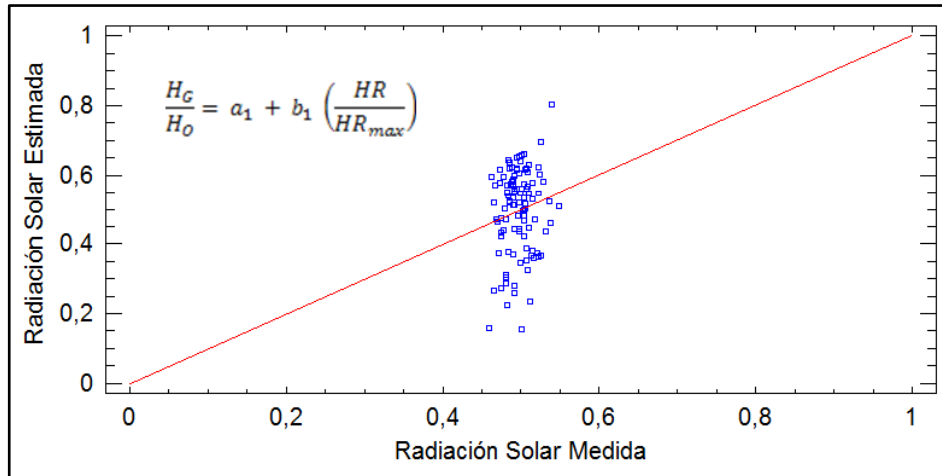


Figura 27 Comparación de la radiación solar medida y modelada por la ecuación de humedad relativa por Benghamen et al. (2009).

Para la regresión estadística entre la estimación de la radiación solar y la humedad relativa. Se presenta una mayor distribución tendiente a lo estimado (0,18 a 0,8), mientras que la concentración de los datos medidos oscila entre 0,45 a 0,55. El modelo en general presenta un coeficiente de relación de 0,169 lo que indica una relación directa y un R^2 de 2,85% manifestando una baja relación entre los datos para el modelo.

En la Tabla 9 se muestra el resumen de los parámetros estadísticos de las regresiones antes descritas; en esta se pueden observar los coeficientes de relación R y R^2 , los coeficientes identificados en la ecuación y el error medio absoluto (MAE) para cada una de las regresiones, la ecuación de mejor ajuste la representa el modelo cuadrático establecido entre la proporcionalidad de cambio de la radiación y las horas de sol.

Tabla 9 Resumen de los regresiones estadísticas.

Función	Coeficiente de la Ecuación				R	R^2 (%)	(MAE)
	a	B	c	d			
$\frac{H_G}{H_o} = a + b \frac{S}{S_o}$	-2,659	1,940	—	—	0,333	11,1	0,209
$\frac{H_G}{H_o} = a + b \left(\frac{S}{S_o} \right) + c \left(\frac{S}{S_o} \right)^2$	12,053	-25,718	14,165	—	—	12,7	0,091
$\frac{H_G}{H_o} = a + b \left(\frac{S}{S_o} \right) + c \left(\frac{S}{S_o} \right)^2 + d \left(\frac{S}{S_o} \right)^3$	46,184	133,754	127,941	39,869	—	12,8	0,090
$\frac{H_G}{H_o} = a_1 + b_1 \left(\frac{T}{T_{max}} \right)$	1,255	0,888	—	—	0,227	5,2	0,089
$<< \frac{H_G}{H_o} = a_1 + b_1 \left(\frac{H_u}{H_{u\ max}} \right)$	1,260	-0,852	—	—	0,146	2,2	0,099

6 DISCUSIONES

En la Tabla 10 se observan los valores de las medias mensuales de temperatura medidos por la estación meteorológica ubicada en las instalaciones de la Universidad de la Costa y las medias mensuales para la temperatura obtenidas por el IDEAM en los meses de Mayo, junio, Julio y agosto.

Tabla 10 Comparación de las medias mensuales de temperatura durante los meses de monitoreo.

MES	IDEAM (°C)	ESTACIÓN (°C)
Mayo	28,1	28,26
Junio	28,1	28,56
Julio	27,9	28,31
Agosto	27,9	28,17
Septiembre	27,65	28,17

Fuente (IDEAM, Datos propios)

El comportamiento de las medias mensuales de temperatura obtenidos por la estación de la Universidad de la Costa están por encima de los reportados por el IDEAM, la diferencia más alta se presentó en el último mes de monitoreo (Septiembre) de 0,52 °C, contrastando con el primer mes de (Mayo) donde se obtuvo la menor diferencia (0,16 °C). No obstante los valores no presentan diferencias significativas ni mayores a 1 grado, lo cual permite inferir la validez de los datos colectados por la estación ubicada en la universidad.

Tabla 11 Comparación de las medias mensuales de humedad relativa durante los meses de monitoreo.

MES	IDEAM (%)	ESTACIÓN (%)
Mayo	79,9	80,2
Junio	81,5	81,2
Julio	79,9	80,85
Agosto	81,5	80,67
Septiembre	82,5	81,4

Fuente (IDEAM, Datos propios)

La Tabla 11 muestra el análisis de las medias mensuales de humedad relativa del distrito de Barranquilla, se observa un comportamiento similar a los datos de temperatura para el primer mes hay una diferencia de 0.30%, mientras que el mes de septiembre la diferencia de las medias mensuales de humedad relativa fue de 1.1%; esto concuerda con los análisis de las medias de temperatura lo que puede indicar que los sensores de temperatura o humedad relativa se pudieron ver influenciados levemente por las condiciones del lugar o agentes externos, teniendo en cuenta que hasta la fecha la única estación que se encuentra ubicada en la zona urbanizada del Distrito es la de la Universidad

de la Costa; las estaciones del IDEAM se presentan en la periferia de la misma (aeropuerto y zona las flores), influenciadas por la dinámica mar/tierra, puesto están en cercanía de cuerpos de agua.

Si se comparan los datos de la radiación solar reportados en los mapas de radiación elaborados por el IDEAM (2005), para los meses de Mayo a Septiembre y los datos medidos por la Estación de La Universidad de la Costa en los mismos meses no se reporta una diferencia mayor a 64 W/m^2 indicando la veracidad de los datos del presente proyecto; se puede atribuir que la diferencia reportada en los datos de cada monitoreo puede estar relacionada con el hecho de que para el caso del IDEAM se reportan datos del total de días por mes, mientras que para el caso de la Estación de la Universidad de la Costa por fallas técnicas no se reportaron las mediciones de todos los días del mes como son los meses de Mayo, Junio y Agosto en los que hay en promedio 48 horas de datos sin reportar por mes. La Tabla 12 muestra el promedio de la radiación solar presentada por el IDEAM y la Estación de la CUC para los meses de Mayo a Junio.

Tabla 12 Comparación de los datos promedios mensuales de radiación solar para el Distrito de Barranquilla.

MES	IDEAM (W/m^2)	ESTACIÓN (W/m^2)
Mayo	239,580	222,516
Junio	218,747	223,195
Julio	260,413	240,453
Agosto	239,580	205,699
Septiembre	239,580	175,555

Fuente (IDEAM, 2005; Datos propios)

En cuanto a las horas de sol, el IDEAM reporta en sus mapas el tiempo total durante el cual incide luz solar directa sobre alguna localidad, entre el alba y el atardecer; mientras que el sensor de la estación reportar mediciones para radiación en términos de la irradiancia es por esta razón que los datos de la estación resultan ser el doble de los datos reportados por el IDEAM, tal como se muestra en la Tabla 13.

Tabla 13 Comparación de los datos promedios mensuales de horas de sol para el Distrito de Barranquilla.

MES	IDEAM (h)	ESTACIÓN (h)
Mayo	7	12
Junio	6	13
Julio	7	13
Agosto	7	12
Septiembre	5	12

Fuente (IDEAM, 2005; Datos propios)

Los análisis de las medias de Fisher permitieron observar lo poca dispersión de los datos para cada hora del día durante los meses de monitoreo, esto evidencia un alto grado de confianza en los sensores de temperatura, humedad relativa y radiación solar instalados en la estación meteorológica. De acuerdo con Gliessman (2002), la humedad relativa puede variar por pequeñas fluctuaciones de temperatura, permitiendo que una disminución de unos grados de temperatura puede aumentar la humedad relativa en un 50%; esta teoría se evidencia en las medias de Fisher, puesto que en las horas donde la temperatura presenta los datos más elevados se reportan los datos más bajos de humedad relativa, debido a que el aumento de la temperatura libera el vapor de agua contenido en el aire disminuyendo el porcentaje de humedad relativa.

Por otro lado, la baja variabilidad de la temperatura se debe a que a las primeras horas de la mañana se percibe la radiación solar permitiendo calentar las masas de aire y a medida que aumenta la radiación aumenta la temperatura, siendo coherente con la similitud presentada entre las medias de Fisher de temperatura y radiación. La situación antes descrita es coherente con lo reportado por Vélez-Pereira et al. (2013), donde reporta un baja variabilidad anual de los datos, a pesar de estar ubicada en cercanías al ecuador y ser una zona de baja altitud.

En cuanto al nivel de correlación de las variables meteorológicas, se observa que todas tienen el mismo grado de correlación con la radiación solar; no obstante el trabajo de Al-Alini y Al-Hanai (1998), manifiestan que la temperatura tiene un mayor grado de correlación seguido por las horas de sol y la humedad relativa. En cuanto al tipo de relación los modelos arrojan que la temperatura y las horas de sol tienen un efecto positivo en el modelo, mientras que la humedad relativa tiene un efecto negativo; esto es coherente con lo presentado en otros estudios (Korachagaon y Bapat, 2012; Al-Alini y Al-Hanai, 1998).

Ahora, para el primer grupo de modelos en lo referente al diseño de las correlaciones simples, se observa que los coeficientes R^2 de la temperatura tienden a ajustarse al resultado presentado por Togrel (2009); no obstante, se encuentra por debajo de los valores presentados por otros resultados que varían entre el 76 a 97% (Pan et al. 2013; Rahikhoob, 2010; Almorox et al. 2011, 2013). Mientras que para el caso de las horas de sol, el valor del coeficiente R^2 es mucho menor al reportados por otros estudios (Benhanem, 2009; Togrul, 2009; Bilgili y Ozgoren, 2011), los cuales varían entre 68,61% y 97,44%; es importante mencionar que esta última variable en la regresión simple, presenta el coeficiente de correlación más bajo de todas las presentadas.

Finalmente para el caso de la humedad relativa, el valor presentado es mucho mayor al presentado por Vélez-Pereira (2013), y además es la regresión simple que presenta el mejor de este subgrupo, con un coeficiente R^2 de 47,1%. En cuanto al error de los modelos se observa un amplio rango, esto se puede deber a que el modelo presenta una menor dispersión de los datos con respecto a lo medido en la estación; estos valores de error son mucho mayor que los presentados en las investigaciones mencionadas anteriormente.

Para el grupo de regresiones múltiples del primer grupo, se observa que la mayoría presentan correlación entre la radiación solar medida y estimada por los modelos, que para el caso de la función $f\{t, T, RH; H\}$, es la que reporta el mayor coeficiente R^2 (48,6%), valor que supera al presentado por Vélez-Pereira (2013), no es mayor al reportado por Benghanem et al. (2009). Seguido de esta ecuación se encuentra la combinación $f\{T, RH; H\}$, la cual nuevamente supera la presentada por Vélez-Pereira (2013); finalmente está la ecuación $f\{t, RH; H\}$ y $f\{t, T; H\}$, que superan a los reportado por Vélez-Pereira (2013). En general este grupo de regresiones presentan un mayor valor de correlación con respecto a las ecuaciones simples. Así mismo se observa que el error de estimación de estos modelos es mucho menor que los anteriores, esto se puede atribuir al hecho que la influencia combinada de las variables, aumente la posibilidad de simular con mayor grado el comportamiento de la radiación solar.

Para el modelo estadístico desarrollado por Angström-Prescott que se basa en la regresión lineal de la razón de la radiación solar y las horas de sol se observa una baja relación, esto debido a la baja variabilidad de las horas de sol y la afectación de componentes atmosféricos como nubosidad y lluvias. Los resultados presentados esta ecuación no se ajustan a los valores de R^2 y MAE calculados por otros autores, como el caso de Yorukoglu y Celik (2006), presentan un coeficiente R^2 85.9% en regresiones presentadas para Turquía con un periodo de monitoreo de 5 años, mientras Bakirci (2009) reporta valores de 6,14%% a 98,07% esto a través de la recopilación de datos de 17 estaciones meteorológicas en distintos lugares de Turquía con periodos de almacenamiento de 7 a 10 años; así mismo Benghanem et al. (2009) reporta un R^2 de 97,4%, Ahwide et al. (2013) reporta valores entre 37,1% - 71,8%, finalmente Vélez-Pereira et al. (2013), presenta un valor de 0,66% para el departamento del Magdalena, Colombia. Ahora si se analizan los MAE se observan que los resultados presentados por esta investigación se encuentran dentro del rango presentado por otros autores (Jin et al., 2005, Wu et al., 2007; Yorukoglu y Celik, 2006; Bakiri, 2009; Vélez-Pereira et al. 2013).

La regresiones cuadrática basadas en Ölgeman et al. (1984) y cubico en Samuel (1991), en la que se relaciona la radiación solar y las horas de sol,

presentan resultados similares; estos modelos reportan para el coeficiente de R^2 los valores más altos en este grupo de modelos, sin embargo no se ajustan a lo presentado por otros estudios (Bakiri, 2009, Benghanem et al., 2009; Wu et al., 2007; Yorukoglu y Celik, 2006), quienes reportan para el modelo cuadrático un rango de valores comprendidos entre el 12,0% y 97,48%) y para el cubico entre 87,6% y 91,3%, estas diferencias pueden generarse a que la variación de la horas de sol tiene mayor afectación en esta investigación debido a que solo se tiene datos recopilados por una sola estación durante cuatro meses mientras que los autores previamente citados donde la variación de las condiciones anuales es más amplia. Por ultimo Vélez-Pereira et al. (2013) en condiciones previamente descritas reporta para el modelo cuadrático un 3,3% el cual se encuentra por debajo de lo obtenido en esta investigación presentando una mayor similitud en los resultados.

Por el contrario los resultados presentados por esta investigación referentes al MAE se ajustan a los resultados de los autores previamente citados para el caso de Yorukoglu y Celik (2006) reporta 0,047 para el modelo cuadrático y 0.040 para el cubico, mientras Wu et al. (2007) presenta valores de 0,032 para ambos modelos, Jin et al. (2005) presenta 1,635 para ambos modelos y por ultimo Vélez-Pereira et al. (2013) y Bakiri (2009) para el modelo cuadrático obtuvo un valor de 0,10 lo que es coherente con los resultados obtenidos en esta investigación y permite evidenciar que los valores obtenidos en los modelos cuadráticos y cúbicos pueden ser empleados para estimar con buena confiabilidad la radiación.

Por último Furlam et al (2010) presenta un coeficiente R^2 de 86.6% y 86.1% para las relaciones de proporcionalidad entre la radiación solar, la temperatura y la humedad relativa respectivamente, mientras Benghanem et al. (2009) presenta valores de 97,28% para el modelo de la temperatura y 86,59% para el modelo de la humedad relativa, así mismo Almorox et al, (2008) reporta entre 89.5% y 88.6% para la regresión lineal entre la radiación solar y la temperatura; para el caso de Colombia Vélez-Pereira et al. (2013), obtuvieron valores de 4.4% y 11.1% para las regresiones previamente mencionadas. Comparando estos datos con la presente investigación se infiere que los valores no se aproximan a los registros presentados por el primer grupo de investigadores, sin embargo se ajustan a lo reportado para el contexto local, siendo los valores más bajos obtenidos para el coeficiente R^2 en la presentan en este grupo de modelos. Estas bajas relaciones presentadas se pueden atribuir a la alta variabilidad de los componentes de temperatura y humedad debido a la época climática en la que se realizó el monitoreo. En cuanto a los resultados del MAE son coherentes, debido a que Almorox et al, (2008) reporta 0,03 para el modelo que relaciona la radiación solar y la temperatura, similarmente Vélez-

Pereira et al. (2013) reportaron un valor de 0,103 para la temperatura y 0,095 para la humedad relativa, lo que infiere una fuerte relación en los resultados.

En general para este segundo grupo de modelos se puede establecer que el modelo que presenta mejor ajuste para estimar la radiación solar es el modelo cubico establecido entre la radiación solar y la horas de sol, esto se puede deber al hecho de la baja variabilidad de los datos de horas de sol permitiendo tener una mayor replicabilidad de los datos. Igualmente se puede observar que el error de estos modelos tiende a ser menor, esto se debe a que los modelos tienden a normalizar y linealizar los datos entre 0 y 1, permitiendo que la dispersión de los mismo disminuya y por tanto disminuya el error presentado en el modelo.

Ahora, si comparamos los dos grupos de modelos podemos observar que para el primer grupo (regresiones) presenta mayores valores de ajuste para la humedad y la temperatura y menores para la hora de sol. Caso contrario sucede en el segundo grupo, esta variación se debe a que el primer grupo la ecuación que describe el modelo se ajusta a la dispersión que presenta, siendo mucho mayor en la temperatura y la humedad; mientras que el segundo grupo los modelos tienden a linealizar los datos, por tanto aquellos que presentan una menor dispersión tienden a presentar un mejor ajuste, tal y como es el caso de las horas de sol.

Finalmente es importante mencionar que las diferencias con otros autores antes descritas para las distintas correlaciones entre la radiación solar y los parámetros meteorológicos se puede atribuir al poco tiempo de monitoreo y a la baja continuidad de recolección de datos, disminuyendo la posible replicabilidad de los datos que contribuya al aumento del coeficiente de correlación y disminuya el error.

7 CONCLUSIONES

Según lo reportado por el monitoreo las variables meteorológicas como temperatura y humedad relativa no presentan variaciones a lo largo de los meses de muestreo; no obstante, si lo presentan a lo largo del día con grandes cambios. En cuanto a la radiación solar se reportan los valores similares a lo del IDEAM con una variación propia del día. En cuanto a la relación entre las variables alternas y la radiación solar, el coeficiente de correlación de Pearson mostro que todas las variables guardan una relación significativa con la variable a modelar, aunque no todas tengan el mismo efecto positivo sobre la radiación solar.

Para el caso de los modelos, el primer grupo presenta un mejor ajuste en las regresiones múltiples, especialmente con las variables de temperatura y humedad, mientras que los modelos estadísticos presentan un mejor ajuste con las horas de sol. Después de analizar los resultados obtenido por la investigación se puede concluir que el tiempo y la continuidad en la medición son condiciones que favoreces la correlación entre el grupo de datos y permiten desarrollar un análisis más preciso de las correlaciones estadísticas y modelos. Para el caso de las regresiones múltiples la que mejores correlaciones presenta es $f\{t, T, RH ; H\}$, mientras que dentro de los modelos estadísticos el que presento mejor ajuste para la estimación de la radiación solar es el modelo exponencial de tercer orden $H_g/H_0 = a + b(S/S_0) + c(S/S_0)^2 + d(S/S_0)^3$. No obstante el mejor modelo de ajuste es la regresión múltiple $f\{t, T, RH ; H\}$.

8 REFERENCIAS BIBLIOGRAFÍA

- Agencia Estatal de Meteorología. (s.f.). Documento de soporte. Recuperado de la URL http://www.aemet.es/documentos/es/eltiempo/observacion/radiacion/Radiacion_Solar.pdf en Julio de 2014
- Ahwide, F., Spena, A., & El-Kafrawy, A. (2013). Correlation for the Average Daily Diffuse Fraction with Clearness Index and Estimation of Beam Solar Radiation and Possible Sunshine Hours Fraction in Sabha, Ghdames and Tripoli-Libya. APCBEE Procedia, 5, 208-220.
- Al-Alawi, S. M., & Al-Hinai, H. A. (1998). An ANN-based approach for predicting global radiation in locations with no direct measurement instrumentation. Renewable Energy, 14(1), 199-204.
- Ali, M. H. (2013). Analysis Study of Solar Tower Power Plant & Its Configuration Effects on Its Performance in Iraq (Baghdad City). Modern Applied Science, 7(4).
- Almorox, J., Benito, M., & Hontoria, C. (2008). Estimation of global solar radiation in Venezuela. Interciencia-Caracas-, 33(4), 280.
- Almorox, J., Bocco, M., & Willinton, E. (2013). Estimation of daily global solar radiation from measured temperatures at Cañada de Luque, Córdoba, Argentina. Renewable Energy, 60, 382-387.
- Almorox, J., Hontoria, C., & Benito, M. (2011). Models for obtaining daily global solar radiation with measured air temperature data in Madrid (Spain). Applied Energy, 88(5), 1703-1709.
- Allen, R. G. (2006). Evapotranspiración del cultivo: guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos (Vol. 56). Food & Agriculture Org.
- Ampratwum, D. B., & Dorvlo, A. S. (1999). Estimation of solar radiation from the number of sunshine hours. Applied Energy, 63(3), 161-167.
- Angström A. (1924) Solar and terrestrial radiation. Q J R Met Soc ;50:121–5.
- Antón, M., Serrano, A., Cancillo, M. L., & García, J. A. (2008). Relationship between erythemal irradiance and total solar irradiance in South-Western Spain. Journal of Geophysical Research: Atmospheres (1984–2012), 113(D14).
- Antón Martínez, Manuel. Modelos empíricos para la estimación de la irradiancia solar ultravioleta. Repositorio Institucional Universidad de Extremadura. Facultad de Ciencias. Departamento de Física.
- Barros, V. (2006). Cambio climático global. Libros del Zorzal.
- Bakirci, K. (2009). Correlations for estimation of daily global solar radiation with hours of bright sunshine in Turkey. Energy, 34(4), 485-501.

- Benghanem, M., Mellit, A., & Alamri, S. N. (2009). ANN-based modelling and estimation of daily global solar radiation data: A case study. *Energy Conversion and Management*, 50(7), 1644-1655.
- Bergonzini, C., Brunelli, D., & Benini, L. (2010). Comparison of energy intake prediction algorithms for systems powered by photovoltaic harvesters. *Microelectronics Journal*, 41(11), 766-777.
- Bilgili, M., & Ozgoren, M. (2011). Daily total global solar radiation modeling from several meteorological data. *Meteorology and Atmospheric Physics*, 112(3-4), 125-138.
- Bindi, M., & Miglietta, F. (1991). Estimating daily global radiation from air temperature and rainfall measurements. *Climate Research*, 1(2), 117-124.
- Bird, R. E., & Hulstrom, R. L. (1981). Simplified clear sky model for direct and diffuse insolation horizontal surfaces. *Unknown*, 1.
- Cabrera, F. J., Baille, A., López, J. C., González-Real, M. M., & Pérez-Parra, J. (2009). Effects of cover diffusive properties on the components of greenhouse solar radiation. *Biosystems engineering*, 103(3), 344-356.
- Castillo, M. C. C., & Jordán, M. A. (1999). *Meteorología y clima* (Vol. 79). Univ. Politèc. de Catalunya.
- Castillo-Álvarez, M., Nikolskii-Gavrilov, I., Ortiz-Solorio, C. A., Vaquera-Huerta, H., Cruz-Bello, G., Mejía-Sáenz, E., & González-Hernández, A. (2007). Alteración de la fertilidad del suelo por el cambio climático y su efecto en la productividad agrícola. *Interciencia*, 32(6), 365-365.
- Cavatte, P. C., Zonta, J. B., Lopes, J. C., de Souza, L. T., Zonta, J. H., & Cavatte, R. P. Q. (2009). Germination and vigor of carrot seeds in limestone mining soil under different light intensities and fertilizations. *IDESIA*, 27(2), 25-32.
- Chen, Y., Randerson, J. T., Morton, D. C., DeFries, R. S., Collatz, G. J., Kasibhatla, P. S., Giglio, L., Jin, Y., & Marlier, M. E. (2011). Forecasting fire season severity in South America using sea surface temperature anomalies. *Science*, 334(6057), 787-791.
- Conselleria de Medio Ambiente e Infraestructura de Galicia (CMATI). 2011. *Atlas de Radición Solar de Galicia URBANO TERRÓN*, Pedro. Tratado de fitotecnica general. Mundi-Prensa. 21Ed Madrid, 1992.
- Cooper, P. I. (1969). The absorption of radiation in solar stills. *Solar energy*, 12(3), 333-346.
- de Felipe Blanch, J. J., y Martínez, J. A. L. (1999). *Sistemas solares térmicos de baja temperatura*. Edicions UPC.
- Distrito de Barranquilla (2013). Sitio oficial de internet, Consultado el 2 de Julio de 2013, recuperado del URL:

- http://www.barranquilla.gov.co/index.php?option=com_content&view=article&id=28&Itemid=119
- Downs, N., & Parisi, A. (2012). Mean exposure fractions of human body solar UV exposure patterns for application in different ambient climates. *Photochemistry and photobiology*, 88(1), 223-226.
- Escamilla Canales, R. (2011). Modelo atmosférico y de radiación solar para reconocimiento de firmas espectrales.
- Escuela Superior de Ingenieros de Sevilla. (s.f.). Documento soporte. Recuperado de la <http://bibing.us.es/proyectos/abreproy/70134/fichero/2.+Tipos+de+Modelos+radiom%E9tricos.pdf> en junio de 2014
- ETSI, E. (2012). 201 873-2:" Methods for Testing and Specification (MTS). The Testing and Test Control Notation version, 3, V3.
- Falcón, N., Peña, F., Mavo, H., & Muñoz, R. (2001). Irradiación solar global en la ciudad de Valencia.(Global solar irradiation in the city of Valencia). *Revista INGENIERÍA UC*, 8(2), 0.
- Fayadh, M. (2011). Experimental Investigation of Thermal Performance of Solar Cooker with Reflector. *European Journal Of Scientific Research*. Vol No. 56, pp 112 – 123.
- Felicísimo, A. M., Morán, R., Sánchez, J. M., & Pérez, D. (2001). Elaboración del atlas climático de Extremadura mediante un sistema de información geográfica. *GeoFocus*, 1, 17-23.
- Forsythe, W. (2002). Parámetros ambientales que afectan la temperatura del suelo en Turrialba, Costa Rica y sus consecuencias para la producción de cultivos. *Agronomía Costarricense*, 26(1), 43-62.
- Flores Salazar D. (2006). Importancia de la medición de la radiación solar. Universidad Benemérita Universidad Autónoma de Puebla.
- Flores-López, R., Sánchez-del Castillo, F., Rodríguez-Pérez, J. E., Mora-Aguilar, R., Colinas-León, M. T., & Lozoya-Saldaña, H. (2009). Influencia de la radiación solar en la producción de semilla-tubérculo de papa bajo cultivo sin suelo. *Revista Chapingo. Serie horticultura*, 15(1), 25-30.
- Furlan, C., De Oliveira, A. P., Soares, J., Codato, G., & Escobedo, J. F. (2012). The role of clouds in improving the regression model for hourly values of diffuse solar radiation. *Applied Energy*, 92, 240-254.
- Gallego, A. P., González, I. F., Sánchez, B. G., Fernández, P. H., Garcinuño, R. M. M., Bravo, J. C. Y., Pradana, J. A. P., García, A. M., Durand, J. S. A. (2012). Contaminación atmosférica. Editorial UNED.
- Gándara, A. S. (2011). Conceptos básicos de gestión ambiental y desarrollo sustentable. Instituto Nacional de Ecología.

- González, A. J., Planells, R. C., & Ribas, S. M. (2006). Tecnología energética y medio ambiente (Vol. 113). Univ. Politèc. de Catalunya.
- Gliessman, S. R. (2002). Agroecología: procesos ecológicos en agricultura sostenible. CATIE.
- Gueymard, C. (1989). A two-band model for the calculation of clear sky solar irradiance, illuminance, and photosynthetically active radiation at the earth's surface. *Solar Energy*, 43(5), 253-265.
- Haywood, R., Andradý, C., Kassouf, N., & Sheppard, N. (2011). Intensity-dependent Direct Solar Radiation-and UVA-induced Radical Damage to Human Skin and DNA, Lipids and Proteins. *Photochemistry and photobiology*, 87(1), 117-130.
- Hematian, A., Ajabshehichi, Y., Behfar, H., & Ghahramani, H. (2011). Designing, construction and analysis of speed control system of the fan with PV feeding source in an air solar collector. *Modern Applied Science*, 6(1), p136.
- Hocaoğlu, F. O. (2010). Novel analytical hourly solar radiation models for photovoltaic based system sizing algorithms. *Energy Conversion and Management*, 51(12), 2921-2929.
- HUBER, A., OYARZUN, C., ALVAREZ, L., & Araya, E. (1988). Características de la radiación solar en un bosque de *Pinus radiata*, en Valdivia, Chile. *Bosque (Valdivia)*, 9(2).
- IDEAM. (2005). COLOMBIA. Ministerio de Minas y Energía -Unidad de Planeación Minero Energética (UPME) y Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial - Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM) Atlas de Radiación Solar de Colombia. Bogotá: UPME - IDEAM.2005
- Iqbal, M. (1983). An introduction to solar radiation. Elsevier.
- Jarma Orozco, A., Cardona Ayala, C., & Araméndiz Tatis, H. (2012). Efecto del cambio climático sobre la fisiología de las plantas cultivadas: Una revisión. *Revista UDCA Actualidad & Divulgación Científica*, 15(1), 63-76.
- Jin, Z., Yezheng, W., & Gang, Y. (2005). General formula for estimation of monthly average daily global solar radiation in China. *Energy Conversion and Management*, 46(2), 257-268.
- Kaplanis, S., & Kaplani, E. (2010). Stochastic prediction of hourly global solar radiation for Patra, Greece. *Applied Energy*, 87(12), 3748-3758.
- Korachagaon, I., & Bapat, V. N. (2012). General formula for the estimation of global solar radiation on earth's surface around the globe. *Renewable Energy*, 41, 394-400.

- Liu, X., Mei, X., Li, Y., Wang, Q., Jensen, J. R., Zhang, Y., & Porter, J. R. (2009). Evaluation of temperature-based global solar radiation models in China. *Agricultural and forest meteorology*, 149(9), 1433-1446.
- Llorca, R. L., y Carrascosa, I. B. (2006). *Prácticas de atmósfera, suelo y agua*. Ed. Univ. Politéc. Valencia.
- Lozano, Á. M. B., Martínez, A. P., Barrera, J. E. E., & Castro, E. C. (2013). Análisis de datos meteorológicos para identificar y definir el clima en Yopal, Casanare. *Revista de Medicina Veterinaria*, (25), 85-92.
- Lucano, M. J., & Fuentes, M. (2010). Evaluación del potencial de radiación solar global en el departamento de Cochabamba utilizando modelos de sistemas de información geográfica e imágenes satelitales. *Revista Boliviana de Física*, 17(17), 13-21.
- Magee, S. (2010). *Solar Radiation, Global Warming and Human Disease*. Steven Magee.
- Martínez, L., Joaniquet, M., Palà, V., & Arbiol, R. (2005). Detection, confirmation and validation of changes on satellite image series. Application to Landsat 7. In *Proceedings of the XXII International Cartographic Conference of the ICA*. A Coruña.
- Martínez, M. F., & Osnaya, P. (2004). Cambio climático: una visión desde México. A. F. Bremauntz (Ed.). Instituto Nacional de Ecología.
- Martínez, N. F., Hernández, M. D., Caicedo, M. M. L., & Gordillo, G. (2008). Análisis Sobre la Correlación Estadística Entre Radiación Solar Global y Temperatura Ambiente en Bogotá. *Revista Colombiana de Física*, 40(2).
- Martínez, P. R. (2010). *Energía solar térmica: técnicas para su aprovechamiento* (Vol. 4). Marcombo.
- Mendoza, I., & Piedra, D. (2006). Validación de modelos de radiación solar directa para la ciudad de Bogotá a partir de datos experimentales. *Revista Colombiana de Física*, 38(4).
- Mellit, A., & Pavan, A. M. (2010). A 24-h forecast of solar irradiance using artificial neural network: Application for performance prediction of a grid-connected PV plant at Trieste, Italy. *Solar Energy*, 84(5), 807-821.
- National Aeronautics and Space Administration NASA. (2010). Observatorio de Dinámica Solar: La misión del "Sol variable". Recuperado de la URL http://ciencia.nasa.gov/science-at-nasa/2010/05feb_sdo/ en junio de 2014.
- Ocampo, O. (2011). El cambio climático y su impacto en el agro. *Revista de Ingeniería Universidad de los Andes*, (33), 115-123.
- Ögelman, H., Ecevit, A., & Tasdemiroğlu, E. (1984). A new method for estimating solar radiation from bright sunshine data. *Solar Energy*, 33(6), 619-625.

- Pallé, E., Goode, P. R., Montañés-Rodríguez, P., & Koonin, S. E. (2006). Can Earth's albedo and surface temperatures increase together?. EOS, Transactions American Geophysical Union, 87(4), 37-43.
- Pan, T., Wu, S., Dai, E., & Liu, Y. (2013). Estimating the daily global solar radiation spatial distribution from diurnal temperature ranges over the Tibetan Plateau in China. Applied Energy, 107, 384-393.
- Poggy- Varaldo Hector, Martinez Reyes Alfonso, Pineda-Cruz José, Caffarel-Mendez Carlos. Tecnologías Solar-Eólica- Hidrogeno- Pilas de combustible como fuente de energía. Tecnológico de estudios superiores de ECATEPEC. Primera edición. 2009. <http://www.relaq.mx/RLQ/tutoriales/e-bookCyT2.pdf>
- Rahimikhoob, A. (2010). Estimating global solar radiation using artificial neural network and air temperature data in a semi-arid environment. Renewable Energy, 35(9), 2131-2135.
- Rojas Acuña, J., Vargas Gargate, P., & Carrillo Gomero, F. (2013). Variabilidad espacial y temporal del espesor óptico de los aerosoles sobre Perú usando imágenes de satélite.
- Rojas, G. C., Rodríguez, C. M., Cervantes, S. C., & Morán-Pineda, M. Contaminación del aire urbano: efectos de la radiación solar.
- Reyes-Coca, S. (2001). Introducción a la Meteorología. Universidad Autónoma de Baja California.
- Rius de Riepen, M., & Castro-Acuña, C. M. (2002). La química hacia la conquista del sol/. Colección "La ciencia desde México, (10).
- Rizwan, M., Jamil, M., & Kothari, D. P. (2010). Solar energy estimation using REST2 model. Journal homepage: www. IJEE. IEEFoundation. org, 1(2), 367-374.
- Samuel, T. D. M. A. (1991). Estimation of global radiation for Sri Lanka. Solar Energy, 47(5), 333-337.
- Sánchez, L. M. A. (1990). Climatología y medio ambiente (Vol. 3). Edicions Universitat Barcelona.
- Sancho, J. M., Riesco, J., Jiménez, C., Sánchez de Cos, M. C., Montero, J., & López, M. (2012). Atlas de Radiación Solar en España utilizando datos del SAF de Clima de EUMETSAT. Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente, Agencia Estatal de Meteorología (AEMET).
- Sarmiento, P. (2007). Energía solar en Arquitectura y construcción. RIL Editores.
- Sarsah, E. A., & Uba, F. A. (2013). Empirical correlations for the estimation of global solar radiation using meteorological data in WA, Ghana. Advances in Applied Science Research, 4(4), 63-71.

- Sendiña, I., & Pérez, V. (2006). Fundamentos de meteorología. Universidad Santiago de Compostela, España.
- Seoáñez Calvo, Mariano; Bellas Velasco, Elena y Seoáñez Oliet, Pilar. 2002. Tratado de la contaminación atmosférica: problemas, tratamiento y gestión. Madrid: Mundi-Prensa. Sexta parte: El cambio climático. La capa de ozono. Indicadores, p.323-383. ISBN 8484760359.
- Sobrino, J. A. (Ed.). (2001). Teledetección. Universitat de València.
- Sueyoshi, T., & Goto, M. (2014). Photovoltaic power stations in Germany and the United States: A comparative study by data envelopment analysis. *Energy Economics*, 42, 271-288.
- Stoebner, P. E., Rahmoun, M., Ferrand, C., Meunier, L., Yssel, H., & Pène, J. (2006). A single sub-erythematous exposure of solar-simulated radiation on the elicitation phase of contact hypersensitivity induces IL-10-producing T-regulatory cells in human skin. *Experimental dermatology*, 15(8), 615-624.
- Tola, J. (2003). Atlas básico de astronomía. Grupo Editorial Norma.
- Togrul, I. T. (2009). Estimation of solar radiation from Angstroms coefficients by using geographical and meteorological data in Bishkek, Kyrgyzstan. *Journal of Thermal Science and technology*, 29(2), 99-108.
- Trigo, J. M. (2000). L'origen del Sistema Solar.
- Universidad de las Americas Puebla. (s.f.). Documento Soporte. Recuperado de la http://catarina.udlap.mx/u_dl_a/tales/documentos/lic/uscanga_s_m/capitulo2.pdf en Julio 2014.
- Valero-Luna Y.C. , García- Gonzales J.M. , García-Salvidar V.M., Ibarra-Castro P. Felix-Flores M.G., Ríos Moreno G. (2007). Modelado de la radiación solar en la Cd. de Zacatecas. Vol. 3, No. 2.
- Vallina, M. M. (2010). Instalaciones solares fotovoltaicas. Editorial Paraninfo.
- Vélez-Pereira, A.M. (2013). Modelación de la Radiación Solar Global a partir de las Condiciones Meteorológicas de Barranquilla, Atlántico. Informe de investigación. Universidad de la Costa CUC.
- Vélez-Pereira, A. M., Vásquez, E. V., Coronell, W. B., & Yepes, D. A. (2013). Determinación de un modelo paramétrico para estimar la radiación solar. *Ingenium*, 7(18), 11-17.
- Vijayakumar, G., Kummert, M., Klein, S. A., & Beckman, W. A. (2005). Analysis of short-term solar radiation data. *Solar energy*, 79(5), 495-504.
- Villegas Álvarez, E. D., Menéndez, M. D. C., Martínez, M. S., Alonso, M. C., & Viera, N. R. (2005). Radiación ultravioleta. Fotoenvejecimiento cutáneo. *MediSur*, 3(1), 14-33.

- Villón, M. (2004). Hidrología. Instituto Tecnológico de Costa Rica. Editorial Tecnológica de Costa Rica.
- Wang, K., & Dickinson, R. (2014). Contribution of solar radiation to decadal temperature variability over land. In EGU General Assembly Conference Abstracts (Vol. 16, p. 1319).
- Webb, A. R., Kline, L., & Holick, M. F. (1988). Influence of Season and Latitude on the Cutaneous Synthesis of Vitamin D3: Exposure to Winter Sunlight in Boston and Edmonton Will Not Promote Vitamin D3 Synthesis in Human Skin*. The Journal of Clinical Endocrinology & Metabolism, 67(2), 373-378.
- Wong, L. T., & Chow, W. K. (2001). Solar radiation model. Applied Energy, 69(3), 191-224.
- World Radiation Center. (2104). Solar Constant recuperado de la URL: <http://www.pmodwrc.ch/pmod.php?topic=tsi/composite/SolarConstant> en Julio de 2014
- Wu, G., Liu, Y., & Wang, T. (2007). Methods and strategy for modeling daily global solar radiation with measured meteorological data—A case study in Nanchang station, China. Energy conversion and management, 48(9), 2447-2452.
- Yorukoglu, M., & Celik, A. N. (2006). A critical review on the estimation of daily global solar radiation from sunshine duration. Energy Conversion and Management, 47(15), 2441-2450.
- Zúñiga, I., & del Arco, E. C. (2010). Meteorología y climatología. Universidad Nacional de Educación a Distancia.